



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Clasificación hidrogeomorfológica de
crecidas fluviales: aplicabilidad a la gestión
del riesgo.

Hydrogeomorphologic classification of river
floods: applicability to risk management.

Autor/es

Marcos Alquézar Bescós

Director/es

Alfredo Ollero Ojeda

**Máster Universitario en Ordenación Territorial
y Medio Ambiental**

Facultad de Filosofía y
Letras 2019/2020

Resumen

El presente estudio pretende clasificar las crecidas fluviales de los ríos Ebro, Gállego y Matarraña por medio de la aplicación de unos índices geomorfológicos pioneros para valorar los daños y riesgos que tienen y poder realizar una gestión del riesgo. Por medio del análisis de una serie de crecidas seleccionadas se calculan unos parámetros y se elaboran los índices geomorfológicos previamente mencionados (Índice de trabajo geomórfico e Índice de peligrosidad en crecida). Una vez calculados se plantean rangos de valores para clasificar ambos índices a nivel de los 3 sistemas fluviales y también como una posible aplicación universal con la finalidad de tener una aplicabilidad de cara a una buena gestión de los riesgos fluviales. Los resultados de la aplicación reflejan que estos índices tienen coherencia con la importancia y los daños provocados por las crecidas fluviales.

Palabras clave: sistema fluvial, hidromorfología, crecida fluvial, gestión del riesgo, peligrosidad.

Abstract

This study aims to classify fluvial flooding of the Ebro, Gállego and Matarraña rivers through the application of pioneering geomorphological indexes to assess the damage and risks they have and to be able to carry out risk management. Through analysis of a series of selected floods, some parameters are calculated and the previously mentioned geomorphological indexes (Geomorphic work index and Flood hazard index) are elaborated. Once calculated, several ranges of values are proposed to classify both indexes at the level of the 3 river systems and also as a possible universal application in order to have an applicability in the face of good management of river risks. The results of the application reflect that these indices are consistent with the importance and damage caused by river flooding.

Key words: river system, hydromorphology, river flood, risk management, hazards.

Índice general de contenidos

1. Introducción.....	4
1.1. Justificación	4
1.2. Antecedentes	5
1.3. Objetivos	5
1.4. Áreas de estudio.....	6
2. Material y método	8
2.1. Datos	8
2.2. Proceso metodológico.....	9
2.3. Parámetros e índices.....	9
3. Resultados	12
3.1. Caracterización de las crecidas	12
3.1.1. Ebro medio (aforo de Zaragoza).....	12
3.1.2. Bajo Gállego.....	23
3.1.3. Alto Matarraña (aforo de Beceite)	37
3.1.4. Síntesis y comparación	48
3.2. Aplicación de parámetros e índices	49
3.2.1. Ebro medio	49
3.2.2. Bajo Gállego.....	51
3.2.3. Alto Matarraña	53
3.2.4. Valoración de las crecidas en función de los índices TG y PC	55
4. Discusión	59
5. Conclusiones	63
6. Referencias	65

1. Introducción

1.1. Justificación

Las crecidas fluviales se identifican, definen y clasifican desde criterios hidrológicos y en especial por su caudal punta o pico de crecida (Davie, 2008). Sin embargo, el máximo caudal alcanzado no es el único indicador relevante para determinar la importancia de una crecida.

Partiendo de la base de la importancia fundamental de las crecidas en el funcionamiento fluvial, tanto geomorfológico como ecológico, así como de la importancia social que pueden alcanzar los daños originados por un proceso de crecida, es preciso analizar otros caracteres de estos eventos extremos. La punta de caudal no es el responsable único, ni siquiera el más relevante, ni en la dinámica geomorfológica fluvial, ni en los procesos ecológicos ni en los efectos en el medio humano (Ollero, 2014). Hay otros aspectos destacables, como la cantidad de agua que circula, la duración, por tanto, de la crecida, el tiempo en que esta se sitúa en determinados umbrales, o el tiempo transcurrido desde la anterior crecida. Modelizar todos estos factores y procesos es complejo y requiere de datos no siempre existentes.

Además de esto, se hace necesaria y útil una adecuada gestión de los riesgos. Las crecidas fluviales originan inundaciones y erosión de márgenes, resultando un peligro universal y frecuente, aunque de fácil previsión espacial por localizarse en los cauces y zonas inundables (Díez Herrero et al., 2008). Trabajar en la adecuada gestión de este riesgo es fundamental y constituye uno de los campos de acción de la geografía.

Este trabajo pretende contribuir a gestionar mejor los riesgos de carácter hidrológico en cauces fluviales. La gestión de riesgos tiene importancia científica y social y debe basarse en la reducción de la exposición y la vulnerabilidad, pero para ello requiere un buen conocimiento de los caracteres y procesos naturales potencialmente peligrosos (Ollero, 2014). Estos trabajos científicos que van encaminados a una mejora en la gestión de los riesgos permiten establecer herramientas claves para reducir los efectos negativos y ordenar de mejor forma el territorio, conjugando su adaptación al medio con las necesidades que demanda.

El presente trabajo desarrolla una metodología simple para llegar a establecer una aproximación a la mayor o menor peligrosidad de crecidas fluviales concretas. Para ello se han seleccionado tres cursos fluviales (Ebro, Gállego y Matarraña) de diferentes características hidromorfológicas y de diferente dimensión de cuenca y por tanto hidrológica. Con esta aplicación sencilla se puede conocer mejor uno de los factores del riesgo, la peligrosidad, y con ello se aporta un indicador útil en la gestión de riesgos.

El conocimiento de las crecidas precedentes, en sus procesos y en sus consecuencias, es una acción básica de previsión para poder gestionar el riesgo en el futuro. Valorar y comparar entre sí las crecidas registradas en los cursos fluviales a estudio es, por tanto, una aportación útil. Además, hay que tener en cuenta la escasez de limnimarcas en nuestro país (Ruiz Bellet, 2016; Victoriano, 2018; Galván, 2018), por lo que el trabajo con los hidrológicos sigue siendo la fuente de información y de interpretación fundamental.

1.2. Antecedentes

El presente trabajo se puede catalogar como experimental y metodológico, por lo que carece de unos antecedentes claros y bien delimitados. De hecho, se podría considerar un estudio pionero que aporta y aplica dos nuevos índices hidrogeomorfológicos para la gestión del riesgo hidrológico que suponen las crecidas fluviales. En cualquier caso, los antecedentes sobre crecidas y gestión del riesgo son abundantísimos en toda la literatura científica internacional. Sin embargo, son escasos los índices y métricas que tratan de evaluar los niveles de peligrosidad y riesgo, aunque se han encontrado aportaciones muy interesantes en diferentes tipologías fluviales y países (Apel et al., 2004; Penning-Rowsell et al., 2005; De Bruijn et al., 2009; Villacis et al., 2009; Environment Agency, 2009; Smith, 2010; Karmakar et al., 2010; Okazawa et al., 2011; Camarasa y Soriano, 2012; Conesa y García Lorenzo, 2014; Alfieri et al., 2014; Hooke, 2015; Schroeder et al., 2016; Patrikaki et al., 2018; Țîncu et al., 2018; Lorenzo et al., 2019; Díez Herrero y Garrote, 2020; Tascón et al., 2020) que van cubriendo el vacío en esta línea. Los trabajos del Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Gobierno Británico (DEFRA, 2003, 2004, 2006) establecieron los primeros índices de interés a partir de datos hidrológicos y encuestas a la población afectada. La implementación de la Directiva europea de gestión de los riesgos de inundación (2007/60/CE) ha permitido incrementar el conocimiento sobre la inundabilidad de muchos territorios, con cartografías de peligrosidad y riesgo muy válidas para el área de estudio. Aporta indicadores, pero no integra estos en índices que valoren los niveles de una forma clara, pero ha permitido sin duda un incremento de los análisis valorativos.

Respecto a los trabajos previos en las áreas de estudio seleccionadas, son muy abundantes los antecedentes de estudios hidrológicos y de riesgos en el curso medio del Ebro (e.g. Ollero, 2000, 2006, 2007, 2020; Ollero y Sánchez Fabre, 2015; Sánchez Fabre et al., 2013, 2015, 2018; Galván, 2018; Ollero et al., 2020), más escasos los del bajo Gállego (Ollero et al., 2004; Ollero y Martín Vide, coords., 2005; Peña et al., 2011, 2020; Marqués, 2018; Martín Vide, coord., 2018) y muy puntuales los del Matarraña (Boné, 2006), centrados en el episodio extraordinario del año 2000 (Del Valle, 2002; Confederación Hidrográfica del Ebro, 2002).

En el Ebro en Zaragoza se probó una metodología de evaluación del riesgo de inundación (Foudi et al., 2015) basada en la desarrollada en el Reino Unido por el DEFRA (2006). Por último, en el marco del Departamento de Geografía y Ordenación del territorio de la Universidad de Zaragoza, se desarrolló un índice de peligrosidad de crecidas fluviales aplicado a cursos efímeros (Salvador, 2016).

1.3. Objetivos

La hipótesis de partida del presente trabajo es que pueden existir indicadores hidrogeomorfológicos en procesos de crecida que aporten información complementaria al simple valor hidrológico de la punta de caudal.

Con base en esta hipótesis, el objetivo general del estudio es el diseño de unos índices hidrogeomorfológicos sencillos de aplicar que puedan ser útiles para la caracterización y la valoración de las crecidas fluviales de cara a un mejor conocimiento de su peligrosidad para la gestión del riesgo.

Desde este objetivo general se pueden concretar varios objetivos específicos:

- La creación de un índice de trabajo geomorfológico en crecida a partir de parámetros hidrológicos.

- La creación de un índice de peligrosidad en crecida apoyado en los mismos indicadores que el índice anterior.
- La aplicación de ambos índices a las crecidas de cursos fluviales con suficiente información hidrológica y geomorfológica, para su verificación y ajuste metodológico, comprobando si los resultados son acordes con los daños que dichos eventos históricos generaron.
- La clasificación de las crecidas fluviales estudiadas en función de los resultados de los dos índices, para generar una primera base de datos que pueda servir para la comparación de eventos en la aplicación futura de estos índices en otros cursos fluviales.

En suma, con todo ello se genera una línea de trabajo que puede resultar de interés y utilidad en la gestión de riesgos derivados de crecidas e inundaciones fluviales.

1.4. Áreas de estudio

Teniendo en cuenta la hipótesis de partida y los objetivos del trabajo, se han seleccionado tres cursos fluviales con características diferentes, en sus dimensiones y en su comportamiento hidrológico (Del Valle et al., 2007), para la primera aplicación de los índices que se construyen en el presente trabajo. Estos cursos son el Ebro medio, el bajo Gállego y el alto Matarraña.

Las diferencias entre ellos son fundamentales para valorar diferentes escenarios en la aplicación e interpretación del trabajo, de cara a la gestión del riesgo.

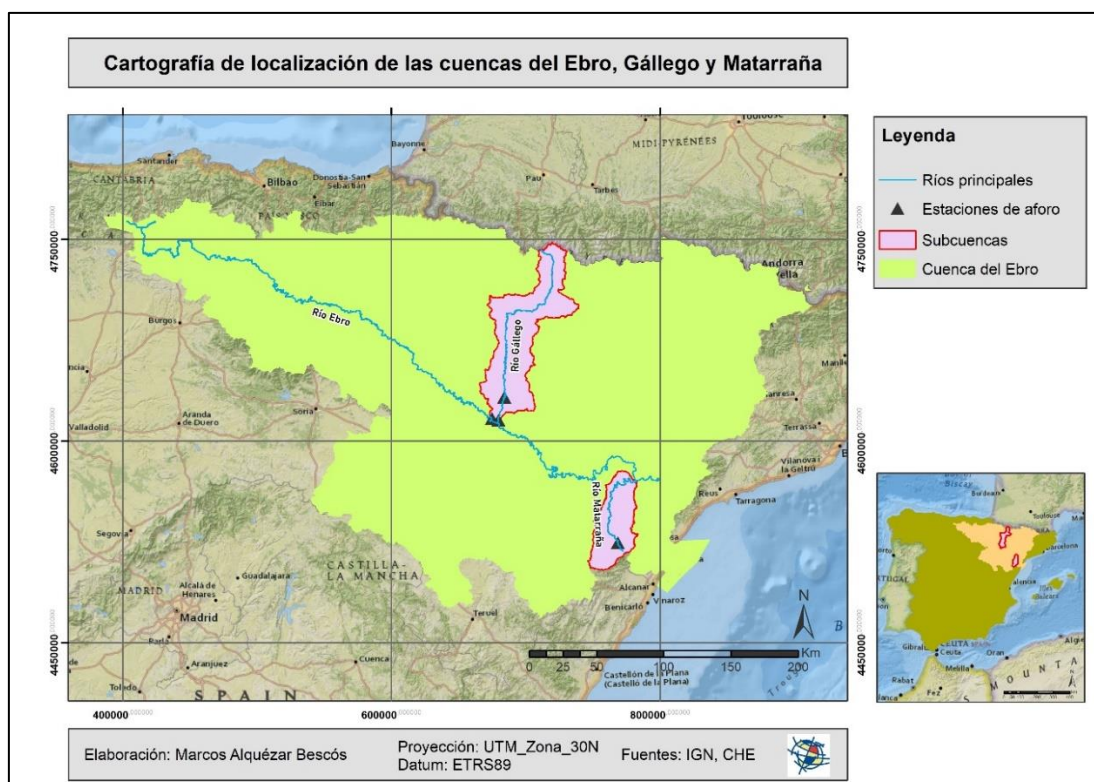


Figura 1: Localización de las áreas de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IGN y la CHE.

Las tres cuencas presentan dimensiones muy diferentes: unos 85.000 km² la del Ebro, unos 4000 km² la del río Gállego y 1250 km² la del Matarraña. En relación con la longitud también existen importantes diferencias: unos 930 kilómetros el Ebro, 193 kilómetros el río Gállego y 97 kilómetros el Matarraña.

Respecto a la cota máxima y mínima de cada sistema fluvial es la siguiente: Ebro: máxima 1980 metros y mínima 0 metros, Gállego: máxima 2200 metros y mínima 200 metros y Matarraña: máxima 1200 metros y mínima 71 metros.

Por último, cabe destacar cuanta cuenca vertiente en km² hay desde el nacimiento hasta los diferentes afluentes. Esto permite compararlo respecto al total de la cuenca en km² y saber si se trata de sistemas fluviales localizados en el curso alto, medio o bajo. En el Ebro hasta Zaragoza la superficie de cuenca es de 40434 km² respecto a los 85000 km² del total. El río Gállego en Zaragoza supone una superficie de cuenca de 4009 km² que coincide con la superficie total al estar la estación de aforo próxima a la desembocadura con el Ebro. Por último, el río Matarraña en Beceite tiene una superficie de cuenca de 48 km² muy inferior a los 1250 km² totales. Esto indica que la estación de aforo está localizada en el curso alto del río muy próxima al nacimiento.

El principal motivo por el que se han elegido estas cuencas diferenciadas es la diferente respuesta hidrológica que presentan, ofreciendo escenarios de mayor diversidad en crecida.

El río Ebro tiene una respuesta hidrológica lenta consecuencia de su gran extensión superficial. Las crecidas además pueden ser simples (un único caudal punta) o complejas (varios caudales puntas dentro de un mismo episodio de crecida) en función de si tienen lugar diferentes episodios de precipitaciones de forma consecutiva. El hecho de que abarque tantos territorios con características climáticas diferentes hace complicado establecer en que fechas se dan los principales caudales punta. En cualquier caso, atendiendo a las crecidas trabajadas se puede establecer como norma general periodos de crecidas en meses invernales y primaverales (principalmente al inicio).

El río Gállego tiene una respuesta hidrológica más rápida que el río Ebro (menor recorrido y por tanto menos tiempo transcurre entre la precipitación y el caudal punta). En este sistema fluvial también se pueden dar tanto crecidas simples como complejas si bien la mayoría de ellas son simples. Al ser un río que nace en las sierras pirenaicas con un régimen climático bien definido permite establecer los momentos principales en los que se dan las crecidas y principales caudales punta. Estas crecidas en líneas generales tienen lugar durante los meses otoñales y primaverales coincidiendo con los momentos de máxima precipitación tanto en el sector pirenaico como en el resto de la cuenca. Ahora bien, es importante destacar el efecto laminador de los embalses que hay a lo largo de la cuenca, con especial interés en los ubicados en la zona pirenaica. El aspecto negativo de esta laminación es que se observa una marcada desnaturalización de los caudales del sistema fluvial.

El río Matarraña tiene una respuesta hidrológica muy rápida con crecidas asociadas a fuertes y cortos periodos de precipitación (crecidas relámpago). En este sistema fluvial a tenor de las crecidas analizadas solamente se observan aquellas que se caracterizan por ser simples (un único pico de caudal máximo o punta con una rápida respuesta hidrológica). Es un río que nace en el Sistema Ibérico con unas características climáticas muy marcadas y un régimen mediterráneo. Las precipitaciones en su cuenca se dan en primavera y fundamentalmente en los meses otoñales asociadas a procesos de gotas frías que originan crecidas muy rápidas y en líneas generales de corta duración (a diferencia del Ebro y Gállego donde estas tienden a durar más en el tiempo).

2. Material y método

2.1. Datos

Como información previa se ha trabajado exclusivamente con datos de caudal hídrico, en concreto los datos diarios y máximos instantáneos de las estaciones de aforo del río Gállego en Zaragoza (A089), del río Ebro en Zaragoza (9011), trasladada en 2010 a Ronda Norte (9311) y del río Matarraña en Beceite (9052).

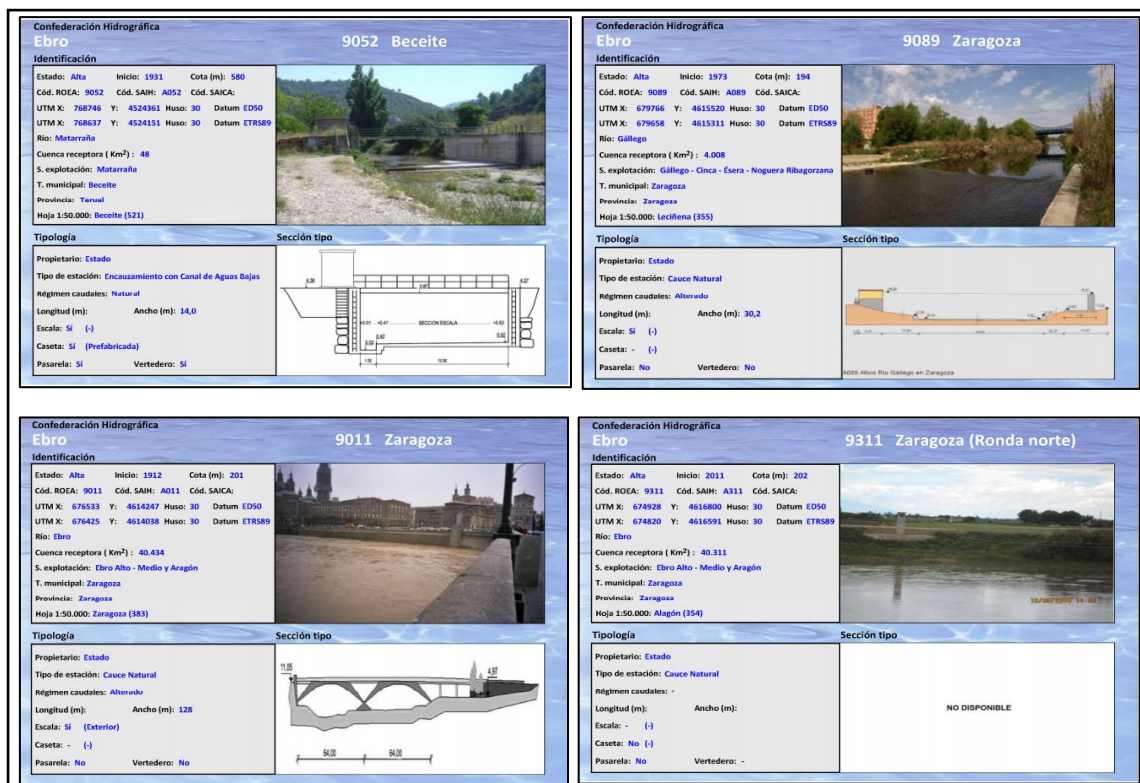


Figura 2: Datos básicos, foto y sección de las estaciones de aforo proporcionadoras de datos para el estudio. Fuente: <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos>

Estos datos se han consultado y recopilado tanto desde la página web de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE en adelante) como desde los Anuarios de Aforos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD en adelante), que se trabajan con mayor facilidad desde la página web del CEDEX (<https://ceh.cedex.es/anuarioaforos>).

Se ha seleccionado la serie que se inicia en 1997 por encontrarse completa y actualizada tras un proceso de revisión interno por parte de la CHE (Ollero et al., 2020). Los datos oficiales concluyen en 2017 y pueden completarse hasta la actualidad con los registros del SAIH.

Para la determinación de los umbrales de crecida, caudal bankfull o geomórfico y caudal crítico de inicio de movilización de sedimentos en cada punto de aforo se ha recurrido a referencias de estudios anteriores en el Ebro (Ollero, 2007; Martín Vide, coord., 2019) y Gállego (Martín Vide, coord., 2018) y a observaciones de campo en el Matarraña. Cada uno de estos sistemas fluviales tiene un caudal bankfull y de inicio de movilización de sedimentos diferente (mayor en el Ebro y menor en el Matarraña). El umbral bankfull para el río Ebro en Zaragoza es de 1600 m³/s (400 m³/s el de movilización de sedimentos). En el caso del río Gállego en Zaragoza el umbral bankfull es de 240 m³/s y el caudal de movilización de sedimentos de 60 m³/s. Por último, para el río Matarraña en Beceite se ha estimado un caudal bankfull de 20 m³/s mientras que el de movilización de sedimentos es de 10 m³/s.

2.2. Proceso metodológico

La metodología desarrollada en el presente estudio ha seguido varias fases diferenciadas:

- 1) Diseño previo de los índices de trabajo geomórfico (TG) y de peligrosidad en crecida (PC) estableciendo los parámetros que utilizan y una ponderación previa de los mismos.
- 2) Recopilación de datos de aforo, identificación y selección de eventos de crecida y determinación de procesos bankfull y de movilidad de sedimentos. Solo se han seleccionado aquellas crecidas en las que el caudal máximo supera el caudal bankfull.
- 3) Construcción de los diferentes hidrogramas de las crecidas seleccionadas marcando el umbral bankfull y el caudal crítico de movilización de sedimentos.
- 4) Cálculo de series temporales para determinar el tiempo que transcurre sin crecidas bankfull entre cada crecida.
- 5) Aplicación de los índices TG y PC a cada crecida de los tres casos de estudio, comprobación de resultados y ajuste de su planteamiento y ponderaciones, rediseñando de forma definitiva ambos índices.
- 6) Aplicación de los índices definitivos y clasificación de las crecidas estudiadas en función de los mismos. Interpretación, comparación y tratamiento de resultados.
- 7) Obtención de periodos de retorno y búsqueda de más información sobre las principales crecidas detectadas, señalando los principales daños provocados, así como algunas herramientas y propuestas de gestión si las hubiera.
- 8) Discusión sobre la aplicabilidad de los índices a la gestión y sobre los eventos registrados desde 1997.
- 9) Redacción de las diferentes partes del estudio y elaboración de conclusiones.

2.3. Parámetros e índices

Ya que tienen un desarrollo previo y otro posterior a lo largo del proceso metodológico, se ha preferido incluir la definición y elaboración de los índices en sí mismos en este apartado de material y método, mientras su aplicación se expondrá en los resultados.

Los dos índices diseñados utilizan una serie de parámetros hidrogeomorfológicos que no suelen ser tenidos en cuenta en la realización de estudios hidrológicos convencionales y que han sido debatidos y madurados en el marco del equipo de trabajo en el que se ha desarrollado el presente estudio.

A continuación, se explica su forma de obtención:

Caudal específico de la punta de la crecida (Q_p). Este parámetro se expresa en l/s/km^2 y su cálculo se realiza mediante el paso de m^3 a litros dividido por la superficie de la cuenca del río. En el proceso de calibración de los índices se ha sustituido este caudal específico por el Coeficiente A de Coutagne (Pardé, 1961), dividiendo los l/s entre la raíz cuadrada de la superficie de la cuenca. Con este parámetro se obtiene un valor relativo de la crecida más acorde a las dimensiones fluviales.

Volumen de caudal de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (V_c). Este parámetro se calcula a partir de los datos de caudal medio diario viendo aquellos días de la crecida que superan el umbral crítico de movilización de sedimentos. En primer lugar, se multiplican los caudales superiores al volumen de caudal por encima del umbral de sedimentos por los segundos que hay a lo largo de un día y después se restan los caudales umbrales de caudal (diferentes para cada uno de los tres sistemas fluviales) multiplicados por los segundos que tiene un día. De esta forma se obtiene el volumen de caudal por encima del umbral de movilización de sedimentos (expresado en m^3). Posteriormente el resultado se expresa en hm^3 haciendo la pertinente conversión. Por último, se suman los volúmenes de todos los días de la crecida que superan el umbral y se obtiene el volumen total de la crecida que sobrepasa dicho umbral. Tras el proceso de calibración del índice se divide este valor entre los km^2 de la superficie de cuenca eliminando de esta forma el factor tamaño del sistema fluvial. Este parámetro se relaciona en muchas ocasiones con los daños causados por el evento, ya que es un caudal geomorfológicamente activo que puede producir consecuencias hidrológicas y también de erosión y sedimentación.

Tiempo de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (T_m) expresado en horas. Se ha medido en cada crecida el tiempo transcurrido desde la primera hora en que se supera el umbral de caudal hasta la última, sumándose al registrado en otra punta de crecida si la hubiera. Cuanto más tiempo dura este caudal más trabajo geomorfológico realiza el río, asociándose a los parámetros anteriores.

Tiempo de crecida geomórfica, en torno al caudal bankfull (entre 10% por debajo y 10% por encima) (T_b) expresado en horas. Considerando que cuando el río o sistema fluvial está en situación bankfull o próximo a ella es cuando presenta mayor energía y competencia, es decir, máxima capacidad de trabajo geomórfico, parece interesante calcular la duración de este tiempo de máximo trabajo, por tanto, también el más capaz para producir efectos geomorfológicos notables como erosión de márgenes, cortas de meandro, crecimiento o formación de barras, etc. Se ha establecido el tiempo en el que el caudal se encuentra entre un 10% por encima y por debajo del nivel bankfull, por lo que en una crecida que supere claramente ese nivel habrá dos pasos por bankfull, uno en subida y otro en bajada, y por tanto dos periodos de tiempo que habrá que considerar y sumar para obtener este parámetro.

Tiempo de crecida con desbordamiento, por encima de bankfull (T_d) expresado en horas. Otro tipo de procesos y cambios geomorfológicos se registran cuando se supera bankfull, y por tanto hay desbordamientos. Este sería el tiempo de crecida activo sobre la llanura de inundación. Se obtiene sobre los datos horarios siguiendo procedimientos similares que en los parámetros anteriores.

Tiempo transcurrido desde la crecida precedente (T_p) expresado en días. Para ello se requiere el dato de caudal máximo instantáneo anual previo a la crecida marcada (para calcular desde esa crecida hasta la primera que supera el umbral bankfull dentro del periodo de tiempo establecido para cada uno de los sistemas fluviales trabajados. La idea para introducir este parámetro es que la peligrosidad y acción geomorfológica de una crecida que tiene lugar muy próxima, con poco tiempo transcurrido desde la anterior crecida, es más elevada. En cambio, una crecida que transcurre después de meses o años sin actividad fluvial encuentra el terreno más estabilizado y tiene más difícil arrancar el trabajo geomorfológico.

Para algunos de los parámetros no se pueden conseguir datos horarios, por lo que es preciso trabajarlos a partir de los datos de caudal medio diario (m^3/s).

En ellos se supone que el caudal medio se da a las 12:00 del día x y a partir de ahí se pueden estimar las horas que transcurren entre el inicio y el final de los diferentes caudales umbral establecidos.

Tras una primera aplicación de prueba de estos parámetros en una primera versión de los índices se procedió a una evaluación y comparación de resultados provisionales. Se comprobó si los índices discriminaban bien y se procedió a la recalibración de cada cálculo.

A partir de este ajuste y recalibrado del índice, con modificación de la ponderación de algunos de los parámetros, se obtuvieron los índices definitivos, que emplean los parámetros expuestos:

El **índice de trabajo geomórfico (TG)** se obtiene de la siguiente expresión: **Índice TG = $Q_p + V_c + T_m + 4 T_b + 3 T_d / T_p$**

Siendo Q_p el caudal específico, V_c el volumen de caudal por encima del umbral de sedimentos, T_m el tiempo de crecida por encima del umbral de sedimentos, T_b el tiempo de crecida geomórfica, T_d el tiempo de crecida con desbordamiento y T_p el tiempo transcurrido desde la crecida precedente.

El **índice de peligrosidad en crecida (PC)** se calcula: **Índice PC = $2 Q_p + 2 V_c + 3 T_b + 3 T_d / T_p$**

En ambos casos se ha optado por establecer una horquilla de valores de los 6 parámetros empleados, de manera que se aplican en la operación no directamente los valores obtenidos sino unos coeficientes asociados a los mismos, tal como se recoge en la tabla 1:

Qp m ³ /s/vkm ²	<5	5-10	10-15	15-20	>20
	1	2	3	4	5
Vc hm ³ /km ²	<0,001	0,001-0,01	0,01-0,025	0,025-0,1	>0,1
	1	2	3	4	5
Tm horas	<10	10-50	50-100	100-500	>500
	1	2	3	4	5
Tb horas	<5	5-10	10-20	20-50	>50
	1	2	3	4	5
Td horas	<5	5-10	10-20	20-50	>50
	1	2	3	4	5
Tp días			<15	15-50	>50
			3	4	5

Tabla 1: Valores aplicados para el cálculo de los índices según el parámetro empleado.

El presente TFM constituye el primer documento en el que se registran estos dos índices, así como la primera aplicación de los mismos.

3. Resultados

3.1. Caracterización de las crecidas

Se han identificado, analizado y caracterizado los eventos de crecida que han superado el caudal bankfull en las tres estaciones de aforo trabajadas. La caracterización incluye los hidrogramas de cada una de ellas. Se concluye este apartado con una síntesis en la que se exponen los aspectos más relevantes de las crecidas de las tres áreas de estudio y se comparan entre sí.

3.1.1. Ebro medio (aforo de Zaragoza)

Este sistema fluvial presenta un régimen hidrológico simple de carácter pluvio-nival con máximos de caudal en los meses invernales-primaverales, siendo febrero el mes de caudal medio más alto. Además, se caracteriza por presentar marcados estiajes en los meses de verano.

Las crecidas invernales son de origen cantábrico (alto Ebro) o pirenaico-cantábricas (cuencas del Arga y Aragón), a raíz de precipitaciones frontales prolongadas en situaciones del NW, siendo las que más incidencia tienen en este tramo medio del río. Las primaverales son más generales y de un origen similar, pudiendo tener mayor papel en ocasiones la fusión nival de los principales sistemas montañosos. Por otro lado, las crecidas otoñales apenas tienen incidencia en el tramo medio del Ebro, siendo relevantes en el tramo bajo mediterráneo).

En el periodo estudiado, desde 1997, ha habido 10 crecidas que han superado el umbral bankfull, todas ellas entre enero y abril.

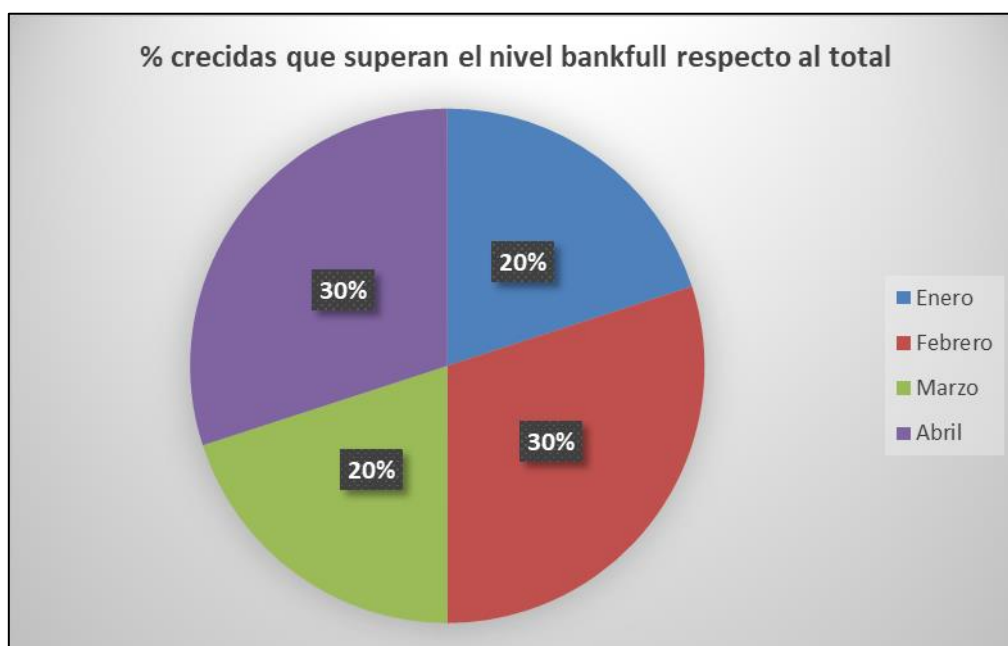


Figura 3: Distribución por meses de las crecidas que superan el nivel bankfull en el aforo del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH.

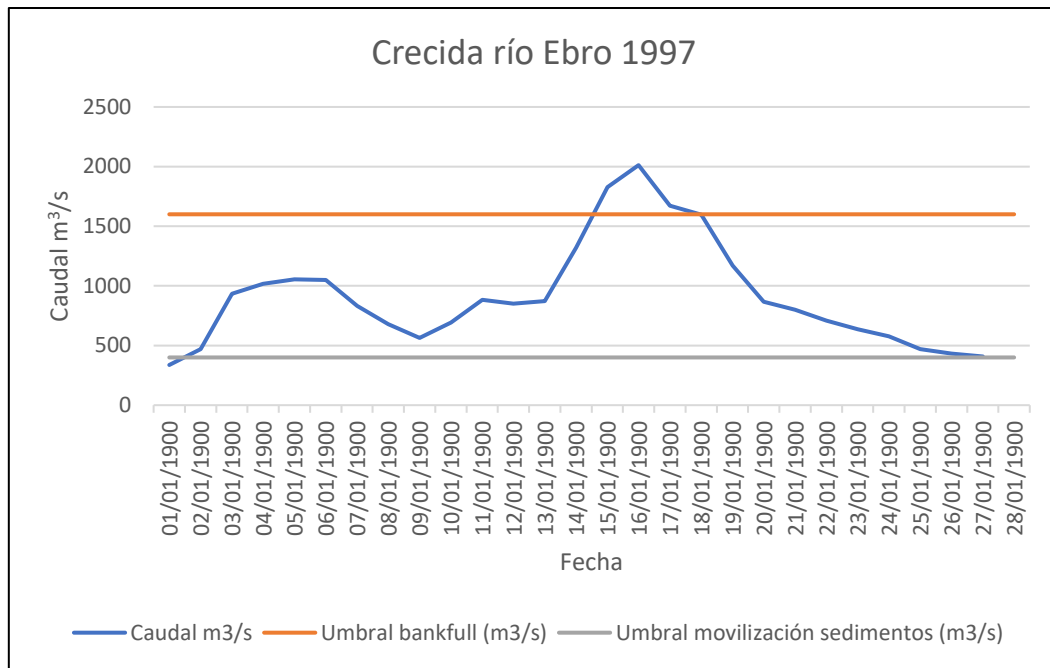


Figura 4: Hidrograma de crecida del año 1997 del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En la crecida de 1997 se pueden apreciar dos picos de caudal punta (uno por encima del umbral bankfull y otro por debajo) por lo que se puede catalogar como una crecida compleja. Otro aspecto a destacar es la duración de la misma prolongándose durante un mes en el tiempo. Analizando por tramos la crecida, se puede observar que el pico de caudal punta secundario es mucho más suave y paulatino que el que se produce en el segundo pico de caudal punta (el máximo). Además, otro aspecto a destacar es que durante prácticamente un mes entero el río tiene capacidad de movilizar sedimentos (caudal superior al umbral que representa la movilidad de sedimentos que es de $400 \text{ m}^3/\text{s}$). Ya, por último, es importante destacar el periodo de tiempo en el que supera el umbral bankfull que es de unos 3 días. Después de alcanzar el caudal se produce un descenso rápido del caudal hasta bajar de los $400 \text{ m}^3/\text{s}$ del umbral de movilización de sedimentos.

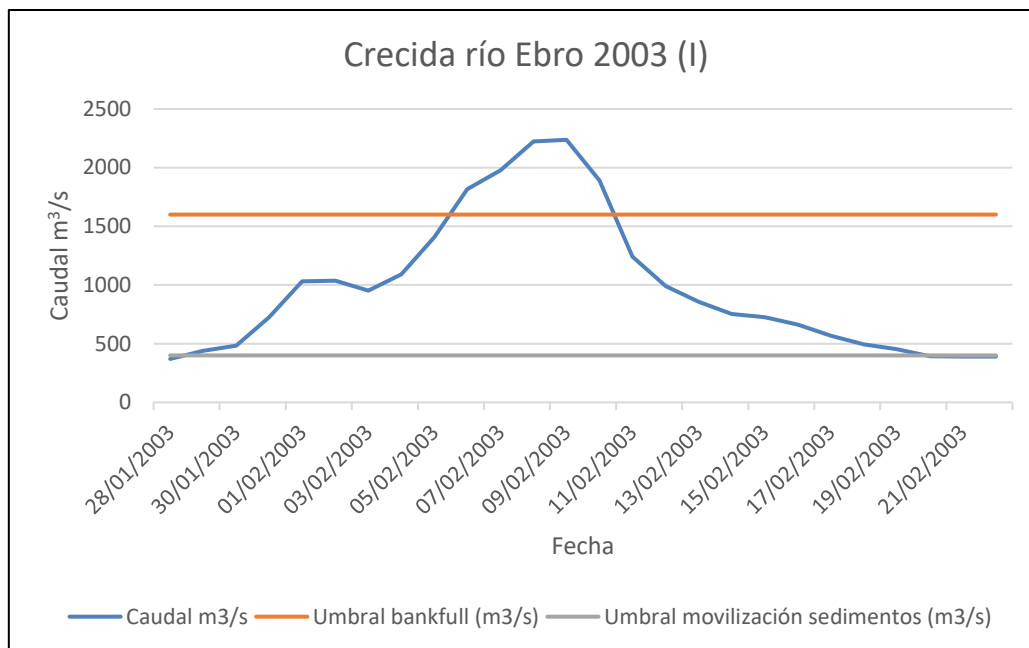


Figura 5: Hidrograma de crecida del año 2003 (I) del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En la crecida de febrero de 2003 (I) se aprecia un único pico de caudal punta, por lo que se puede catalogar como una crecida simple. En relación con la duración de la misma es inferior a un mes, pero se prolonga a lo largo de 3-4 semanas. El ascenso de caudal es paulatino y por tramos, observándose un lento ascenso hasta alcanzar los $1000 \text{ m}^3/\text{s}$; caudal que mantiene durante algunos días antes de iniciar un ascenso más marcado y rápido hasta alcanzar el caudal máximo de la crecida. Una vez llegado a este máximo permanece unos días en “meseta” sin oscilaciones de caudal hasta iniciar un marcado descenso de caudal bajando de los $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (umbral de movilización de sedimentos).

Otro aspecto importante es el tiempo que permanece movilizandose sedimentos que es prácticamente durante toda la crecida (3-4 semanas). Por último, el periodo de tiempo que supera el umbral bankfull es mayor que en la crecida de 1997 y se prolonga durante 4 días aproximadamente.

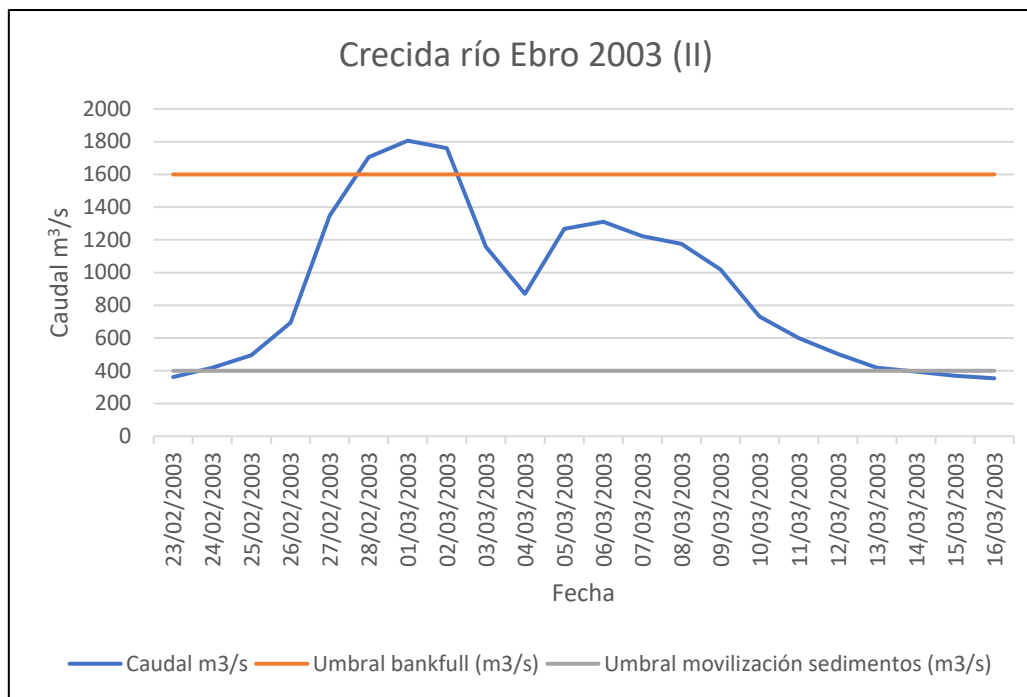


Figura 6: Hidrograma de crecida del año 2003 (II) del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Esta crecida de febrero de 2003 (II) se produce de forma prácticamente consecutiva a la anterior, sin apenas días entre ambas, aspecto a tener en cuenta de cara a la gestión de riesgos. Entrando en el análisis de la gráfica se pueden apreciar dos picos de caudal (el primero el que marca el caudal máximo de la crecida) por lo que nos encontramos con una crecida de carácter complejo. En relación con la duración, se estipula en unas 3-4 semanas al igual que la crecida precedente. El ascenso de caudal hasta el pico principal es homogéneo y bastante rápido para después iniciar un rápido descenso hasta iniciar el ascenso al último pico de caudal, en este caso secundario. El caudal máximo de la crecida permanece unos días en meseta al igual que el pico secundario ($1300 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente) antes de descender a un caudal por debajo del umbral de movilización de sedimentos.

El último aspecto reseñable es el periodo de movilización de sedimentos que al igual que en las crecidas previas descritas se da durante toda la crecida. En este caso concreto se alarga durante 3-4 semanas aproximadamente. En relación con el umbral bankfull se supera durante el momento en el que se da el caudal máximo de la crecida (2 días contabilizados).

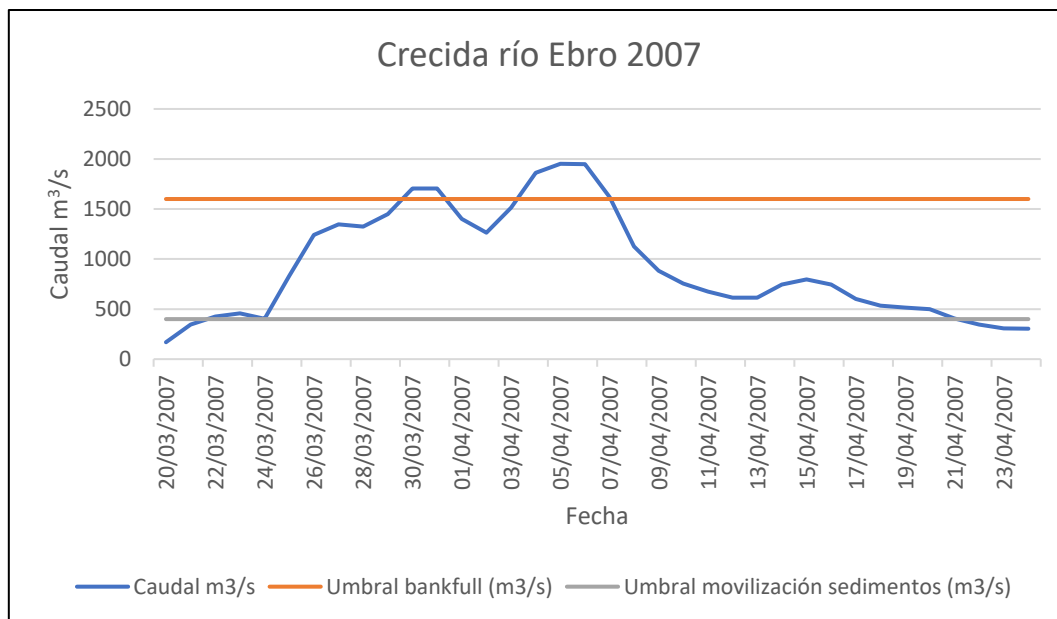


Figura 7: Hidrograma de crecida del año 2007 del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2007 se aprecian dos picos de caudal punta, por lo que se cataloga con el carácter de compleja. La principal diferencia con las anteriores crecidas complejas que se han descrito son las características de los dos picos de caudal. En este caso, los dos picos de caudal superan el umbral bankfull de $1600 \text{ m}^3/\text{s}$. En relación con la duración de la misma, es prácticamente de un mes salvo unos días en los que el caudal no llega al umbral crítico de movilización de sedimentos ($400 \text{ m}^3/\text{s}$ en el caso del río Ebro). Analizando la crecida por tramos, se puede apreciar que el ascenso hasta el primer pico de caudal lleva diferentes ritmos y no es regular, a diferencia del segundo donde tras un leve descenso desde el primer pico se constata un incremento de caudal homogéneo y rápido. Posteriormente se produce un rápido descenso de caudal hasta llegar a un estancamiento superando en cualquier caso el umbral de movilización de sedimentos.

Otro aspecto importante es el periodo de tiempo que el sistema fluvial es capaz de movilizar sedimentos. Salvo los primeros días y los últimos, el río tiene capacidad de movilizar sedimento. Se establece como periodo de tiempo que permanece movilizandose sedimentos un mes aproximadamente. Así mismo, permanece 5 días superando el umbral bankfull sumando los días del primer y segundo pico de la crecida.

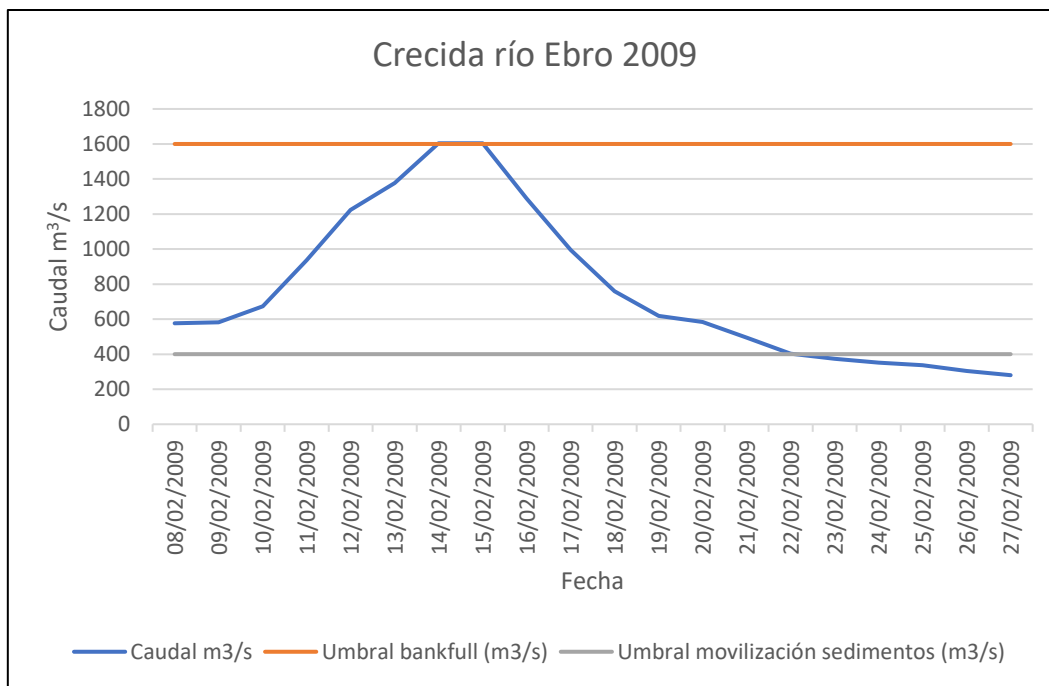


Figura 8: Hidrograma de crecida del año 2009 del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2009 se aprecia un único pico de caudal punta siendo por tanto una crecida simple. La principal diferencia con las anteriores crecidas es que el caudal punta está en el límite del umbral bankfull, sin apenas superarlo.

Analizando la duración de la crecida, es ostensiblemente menor que las anteriores, con una duración aproximada de 2-3 semanas.

Por tramos, se puede ver que la crecida es muy homogénea con un ascenso constante hasta el pico de caudal y un descenso similar hasta valores inferiores a los $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por último, haciendo referencia al periodo que moviliza sedimentos y que supera el caudal bankfull es muy inferior a las crecidas previas. En el primero de los casos el periodo se reduce a 2 semanas y en el caso del umbral bankfull no se supera ni siquiera durante una hora a lo largo de la crecida.

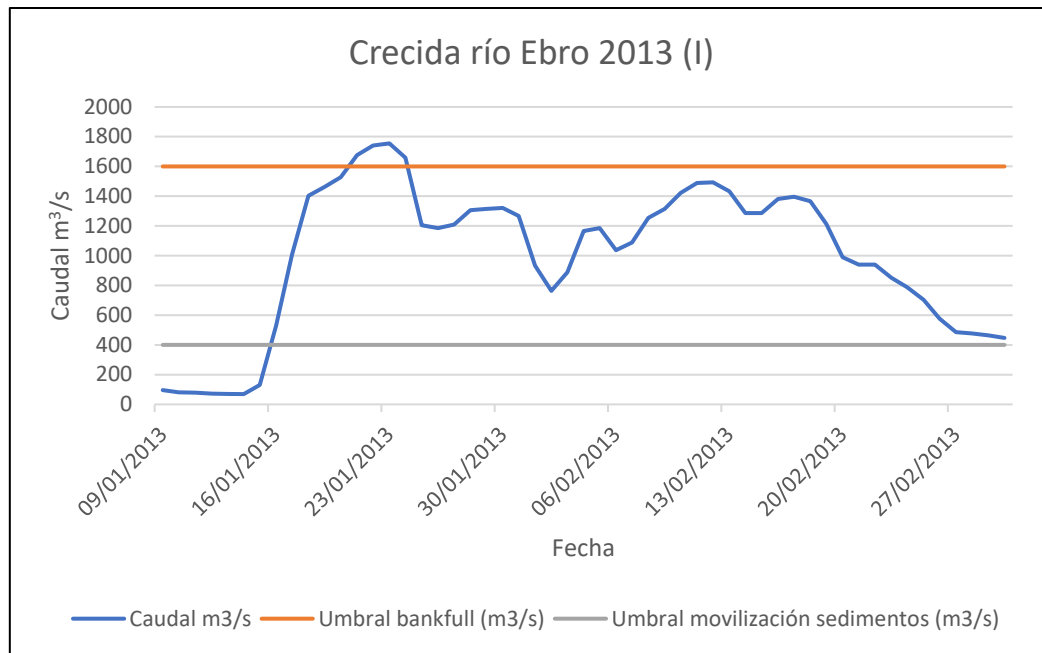


Figura 9: Hidrograma de crecida del año 2013 (I) del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2013 (I) destaca la existencia de numerosos picos de caudal máximo haciendo que sea una crecida con un carácter complejo. Esta crecida tiene características muy diferentes a las anteriormente descritas. A pesar de esto, solo se aprecia un único pico de caudal que supera el umbral bankfull establecido en $1600 \text{ m}^3/\text{s}$.

En relación a la duración de esta crecida, es la más larga de las hasta ahora analizadas. Se alarga durante mes y medio aproximadamente con caudales que en muchos momentos superan los $800 \text{ m}^3/\text{s}$ de forma continuada.

Por tramos, se puede observar una irregularidad con fuertes oscilaciones de caudal. Se produce un ascenso de caudal *grosso modo* regular hasta el primer pico de caudal (máximo de toda la crecida) y después una concatenación de cortos descensos y ascensos de caudal hasta el descenso final de la crecida donde todavía se sigue superando ligeramente el umbral de movilización de sedimentos.

Por último, se hace referencia al periodo de tiempo en el que se supera el umbral bankfull y el de movilización de sedimentos. Respecto al primer parámetro, tan solo se supera en el primer pico de caudal durante tres días aproximadamente. En relación con el segundo, tan solo hay un periodo inicial de la crecida donde no se supera. Se estima una duración de mes y medio con caudales superiores a los $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

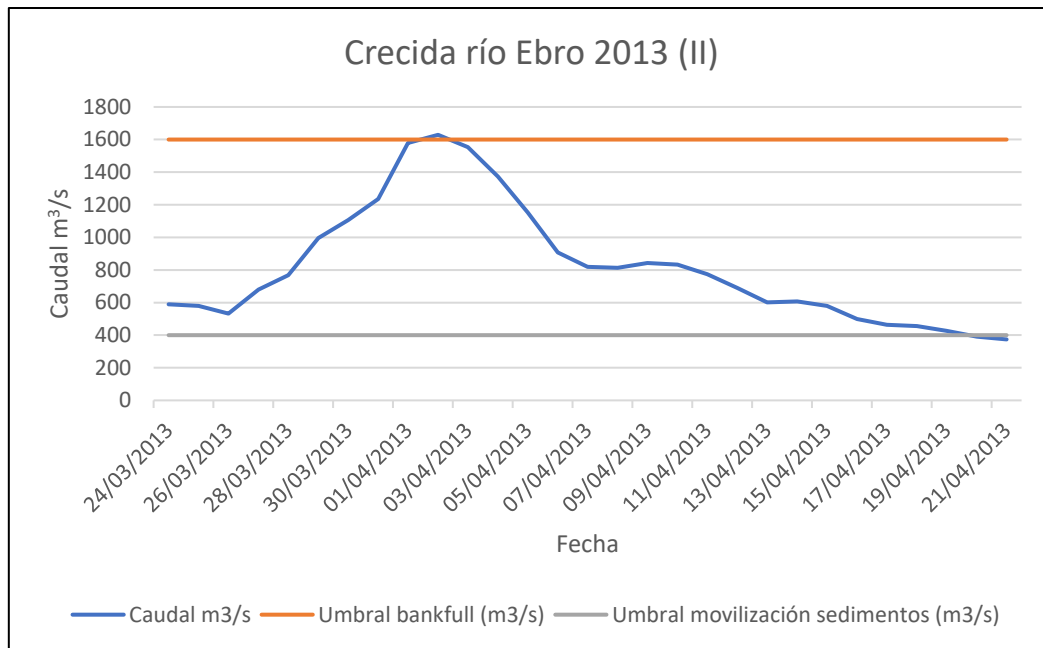


Figura 10: Hidrograma de crecida del año 2013 (II) del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2013 (II) se aprecia un único pico de caudal máximo, por lo que nos encontramos en una crecida de carácter simple. Tiene unas características similares a las de la crecida del año 2009 aunque con algunos matices (mayor duración y supera ligeramente el umbral bankfull de los $1600 \text{ m}^3/\text{s}$).

Analizando la duración, es de prácticamente un mes a diferencia de la de 2009 que era de 2-3 semanas.

Por tramos de la gráfica, se observa un ascenso de caudal homogéneo y constante hasta el pico de caudal punta y un descenso paulatino con alguna interrupción en el descenso de caudal por estabilización.

Los últimos aspectos a tratar son la duración en tiempo del caudal superior al umbral bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, hay que incidir en que se supera durante un solo día, sin embargo, los $400 \text{ m}^3/\text{s}$ se superan durante toda la crecida con la salvedad de los últimos días para dar un total de 27 días.

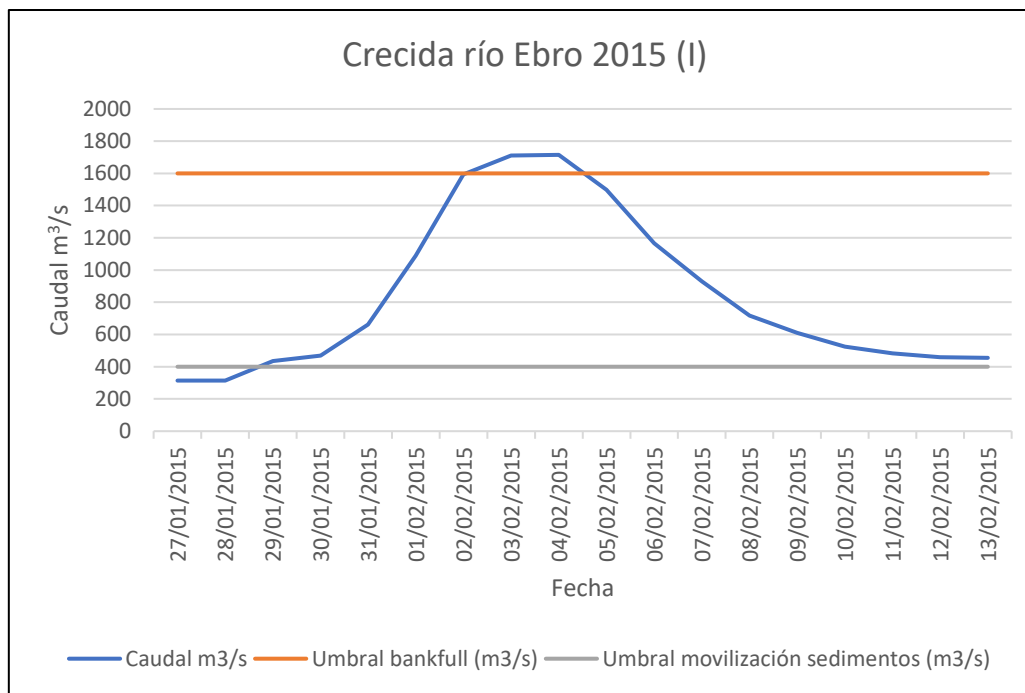


Figura 11: Hidrograma de crecida del año 2015 (I) del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2015 (I) al igual que en la crecida precedente existe un único caudal punta, por tanto, estamos ante una crecida de carácter simple. La principal diferencia con las anteriores crecidas simples es su homogeneidad (ascenso y descenso de caudal sin interrupciones y constante).

La principal característica es su corta duración siendo de tan solo 2 semanas. Esto es debido al ascenso y descenso de caudal sin interrupciones de ningún tipo.

Por tramos en la gráfica, simplemente hay que señalar un primer tramo de ascenso constante y homogéneo de caudal hasta el pico de la crecida y un segundo tramo de descenso también constante y homogéneo hasta niveles próximos a los $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como últimos aspectos, destacar que el umbral bankfull se supera durante 3 días aproximadamente y el umbral de movilización de sedimentos se supera durante dos semanas aproximadamente.

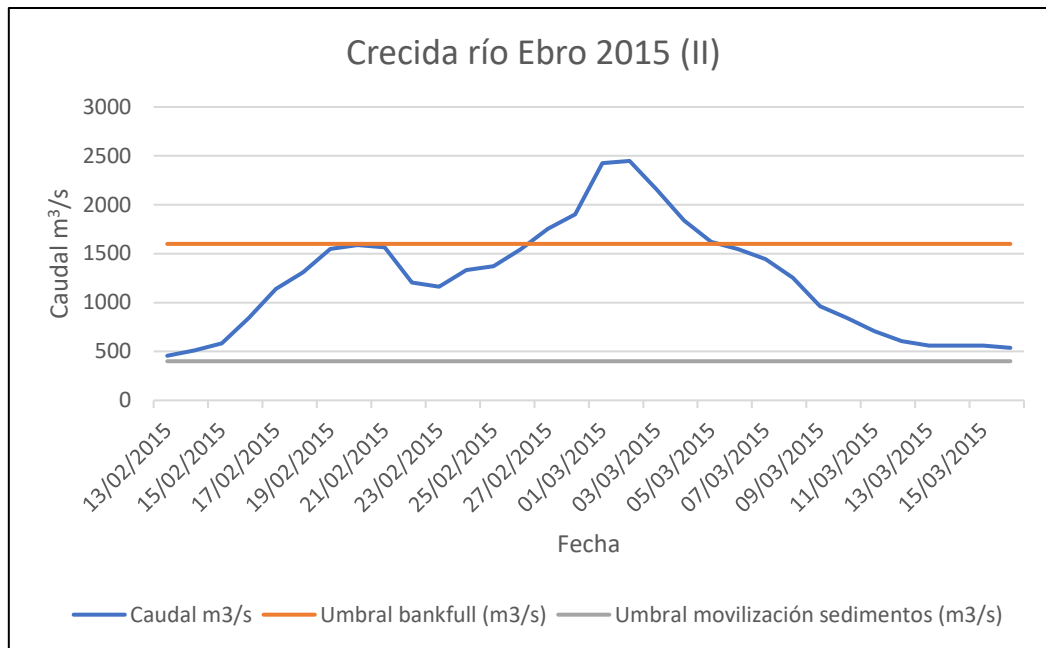


Figura 12: Hidrograma de crecida del año 2015 (II) del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2015 (II) se aprecian dos caudales punta, superándose el umbral bankfull en uno de ellos. Se puede hablar de esta forma de una crecida con carácter complejo.

Entrando en la duración, se extiende durante un mes y es prácticamente una continuación de la anterior crecida analizada, aunque con una mayor duración y características diferentes.

En el análisis de la crecida por tramos, se pueden diferenciar 3 tramos principales. El primero es un ascenso de caudal desde los 500 hasta prácticamente los 1600 m^3/s , el segundo otro ascenso de caudal desde los 1200 hasta prácticamente los 2500 m^3/s y por último un descenso hasta los 500 m^3/s . El primer tramo presenta unas características homogéneas y de ascenso de caudal constante, el segunda tramo (tras un ligero descenso de caudal) presenta una parte inicial de ascenso lento y similar al primer tramo para acabar con un incremento de caudal más rápido hasta llegar al pico de crecida. El tercer y último tramo se inicia con un descenso pronunciado de caudal que luego se suaviza hasta estancarse sobre los 500 m^3/s .

El último aspecto a comentar es el tiempo de duración en el que se superan los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto del primero, como se ha comentado previamente solo hay un momento donde se supera dicho umbral. El periodo de tiempo en el que el caudal supera los 1600 m^3/s es de 6 días aproximadamente. En relación con el último, se supera a lo largo de toda la crecida, por lo que su duración estimada es de un mes.

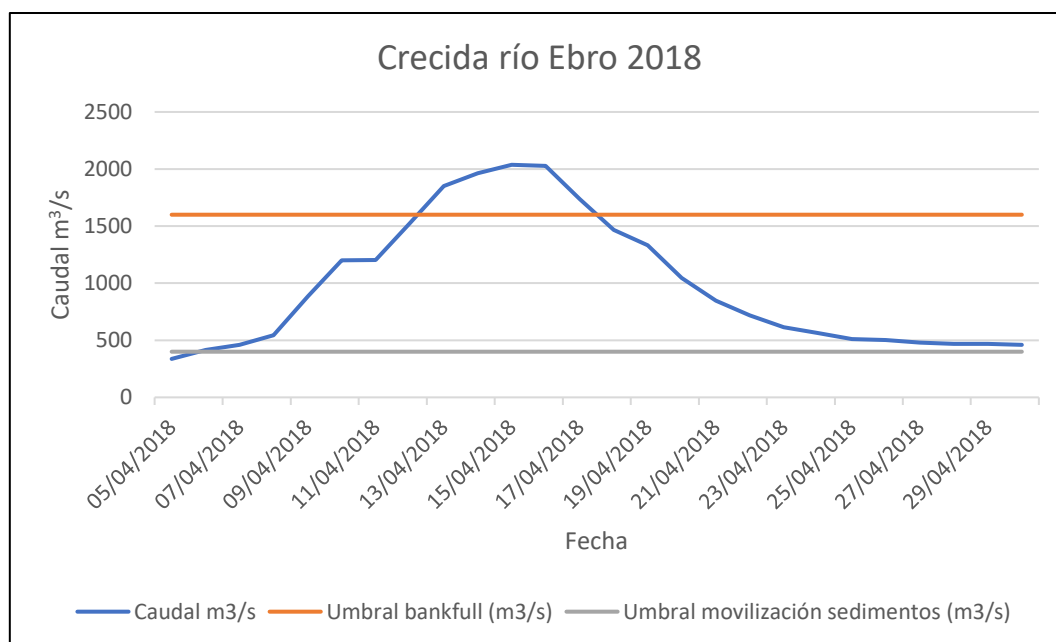


Figura 13: Hidrograma de crecida del año 2018 del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2018, solo se puede apreciar un caudal punta, por lo que se trata de una crecida de carácter simple.

Entrando en la duración, se observa a raíz de la figura x que es de unas 3 semanas y media aproximadamente.

Por tramos a lo largo de la gráfica, la crecida se puede dividir en dos. Un primer tramo de ascenso de caudal *grosso modo* regular y constante y un segundo tramo de descenso de caudal también con un carácter regular. El primer tramo supone un ascenso de un caudal desde los $400 \text{ m}^3/\text{s}$ del umbral de movilización de sedimentos hasta superar ligeramente los $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. El segundo tramo supone un descenso desde los 2000 hasta los $500 \text{ m}^3/\text{s}$ superando ligeramente el umbral de movilización de sedimentos.

Como último aspecto, se pueden destacar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, se supera por $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (de los $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ fijados como umbral hasta los $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ que se alcanzan en la punta de la crecida). El tiempo de duración durante el que se supera dicho umbral se establece en 5 días aproximadamente. En relación con el umbral de movilización de sedimentos se supera durante prácticamente toda la crecida, por lo que su duración es de 3 semanas y media aproximadamente.

3.1.2. Bajo Gállego

Este sistema fluvial cuenta con un funcionamiento hidrológico muy condicionado y alterado por la existencia de varios embalses y derivaciones a lo largo de su curso alto y medio. En su curso bajo, por tanto, se observan grandes diferencias entre el régimen real y natural, con caudales medios muy inferiores a los esperados en condiciones de naturalidad. Las crecidas pueden ser episodios primaverales y también otoñales. Son generalmente crecidas rápidas con una punta de caudal bien definida. En el periodo estudiado, desde 1997, ha habido 11 crecidas que han superado el caudal bankfull, de las cuales 5 primaverales, 5 otoñales y una invernal.

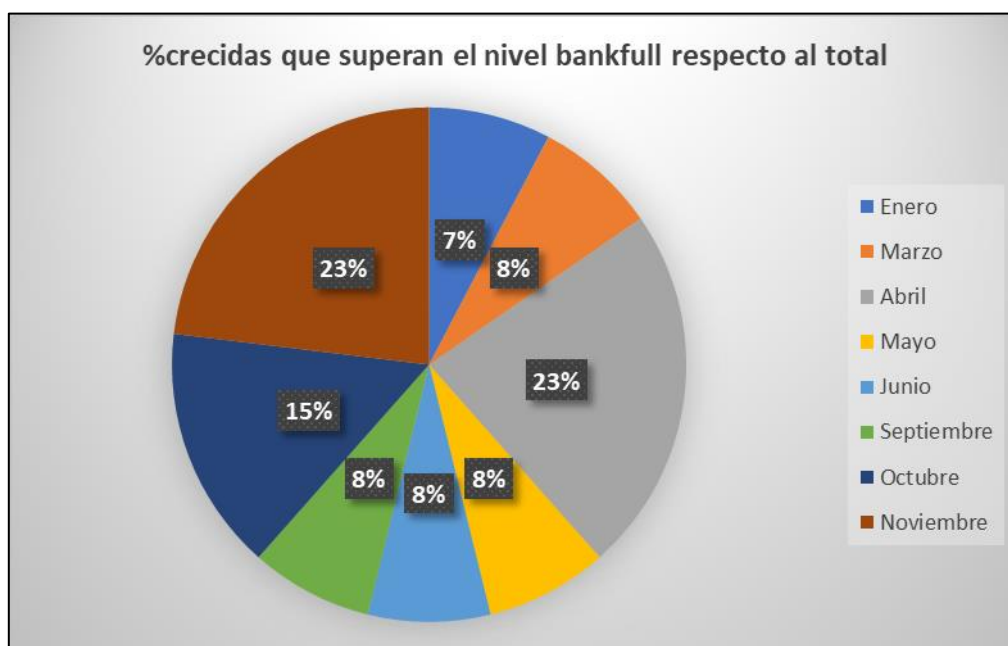


Figura 14: Distribución por meses de las crecidas que superan el nivel bankfull en los aforos del río Gállego en Zaragoza y Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH.

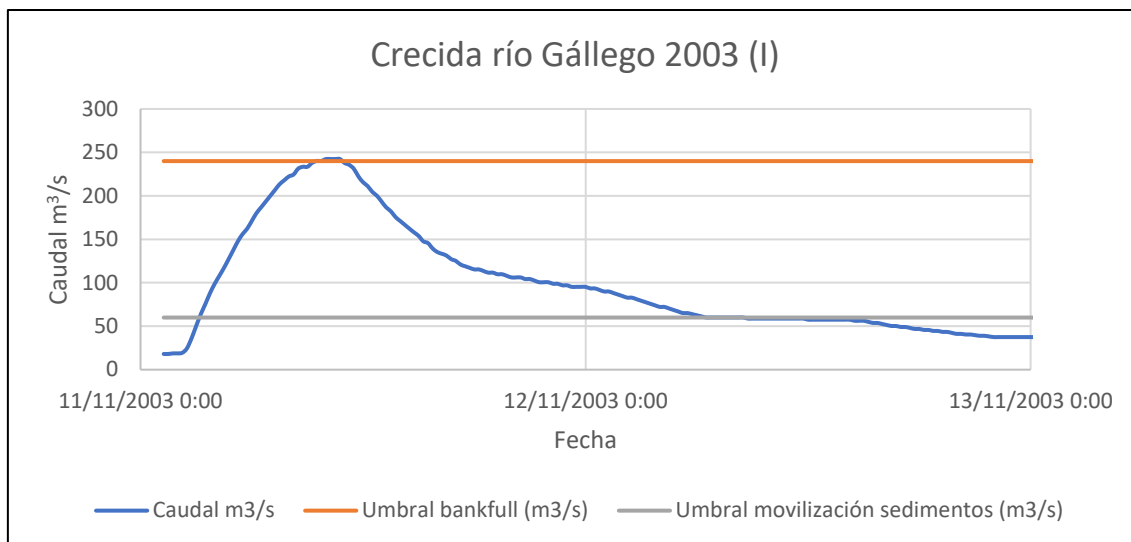


Figura 15: Hidrograma de crecida del año 2003 (I) del río Gállego en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2003 (I) se aprecia un único caudal punta, por lo que se trata de una crecida de carácter simple.

Analizando la duración de esta, destaca su brevedad temporal. Apenas dura 2 días la crecida desde el comienzo.

Por tramos de la gráfica, la crecida se divide en dos tramos bien diferenciados: un primer tramo con un ascenso rápido de caudal y otro tramo con un descenso rápido en primera instancia y posteriormente más suavizado. El primer tramo destaca por pasar en un corto periodo de tiempo de un caudal ostensiblemente inferior al umbral de movilización de sedimentos ($60 \text{ m}^3/\text{s}$ para este sistema fluvial) a superar el umbral bankfull establecido en $240 \text{ m}^3/\text{s}$ para este sistema fluvial. El segundo tramo se inicia con un marcado descenso desde los 240 hasta los $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Posteriormente se ralentiza el descenso hasta estabilizarse por debajo de los $50 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando se da por finalizada la crecida.

Por último, en la línea de los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos se puede destacar el escaso periodo temporal en el que estos se superan. Esto va en consonancia con la corta duración en términos genéricos de la crecida. En relación con el umbral bankfull se supera durante un par de horas aproximadamente. El umbral de movilización de sedimentos se supera durante un día y medio. Esto demuestra la corta duración de la crecida.

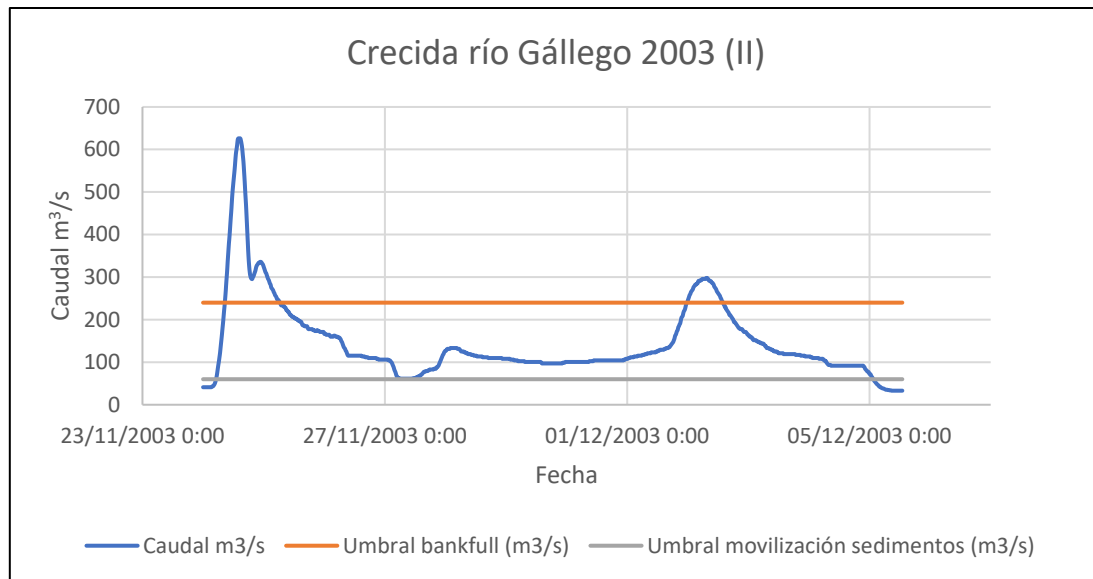


Figura 16: Hidrograma de crecida del año 2003 (II) del río Gállego en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Esta crecida de 2003 (II) se caracteriza por presentar dos picos de caudal que superan el umbral bankfull y tener un carácter complejo. Otro aspecto importante es el corto espacio de tiempo transcurrido desde la anterior crecida analizada a esta.

Respecto a la duración, es ostensiblemente mayor que la crecida precedente. Se estipula en aproximadamente dos semanas desde el comienzo hasta el final.

Por tramos de la gráfica se puede dividir la crecida en 4 tramos dado su carácter complejo. El primer tramo se caracteriza por un ascenso muy rápido de caudal en corto periodo de tiempo y pasando de un caudal inferior a los $60 \text{ m}^3/\text{s}$ a superar los $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal máximo de toda la crecida). El segundo tramo se caracteriza también por un rápido descenso, pero a diferencia del primer tramo, el descenso se estanca muy por encima del umbral de movilización de sedimentos. El caudal está sobre los $100 \text{ m}^3/\text{s}$ y como umbral se han establecido $60 \text{ m}^3/\text{s}$. El tercer tramo se caracteriza también por un ascenso rápido de caudal (de los $100 \text{ m}^3/\text{s}$ a los $300 \text{ m}^3/\text{s}$ del segundo caudal punta). A diferencia del primer tramo este ascenso no es tan virulento y es más paulatino. El último tramo es un descenso *grosso modo* regular de caudal hasta situarse por debajo de los $60 \text{ m}^3/\text{s}$ y darse por finalizada la crecida.

El último aspecto para remarcar de esta crecida va en consonancia con los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. A diferencia de la crecida precedente la duración temporal en que se superan dichos umbrales es notablemente mayor. El umbral bankfull se supera durante aproximadamente 24 horas mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante aproximadamente 12 días.

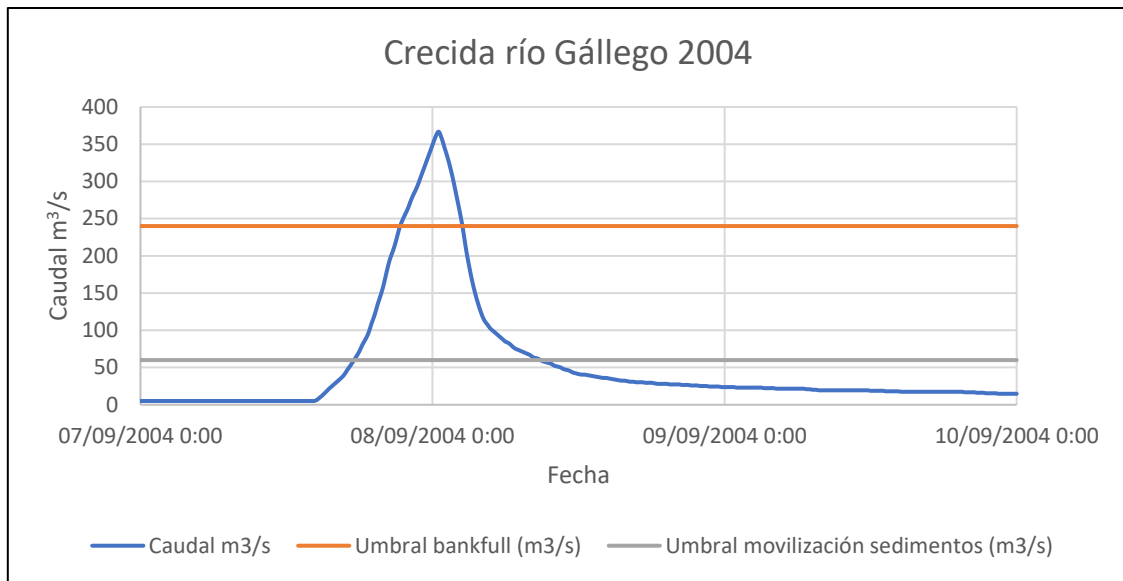


Figura 17: Hidrograma de crecida del año 2004 del río Gállego en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2004 se observa un único caudal punta, por lo que se caracteriza por ser simple.

Atendiendo al aspecto de duración temporal es una crecida corta de apenas un par de días (muy similar a la crecida de 2003 (I)).

Por tramos de la gráfica, se observa que esta crecida se puede dividir en dos tramos con características muy similares al tratarse de una crecida de carácter simple. El primero de los dos tramos se caracteriza por un ascenso muy rápido de caudal desde prácticamente los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta superar los $350 \text{ m}^3/\text{s}$. El segundo tramo consiste también en un rápido descenso de caudal desde la punta con $350 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta caer por debajo de los $60 \text{ m}^3/\text{s}$. En este momento se ralentiza la caída hasta estancarse en valores de unos $20 \text{ m}^3/\text{s}$ que es cuando se da por finalizada la crecida.

Por último, en relación con la duración temporal en que se superan los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos es escasa al igual que en la crecida de 2003 (I). El umbral bankfull se supera durante 5 horas aproximadamente mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante unas 14 horas aproximadamente.

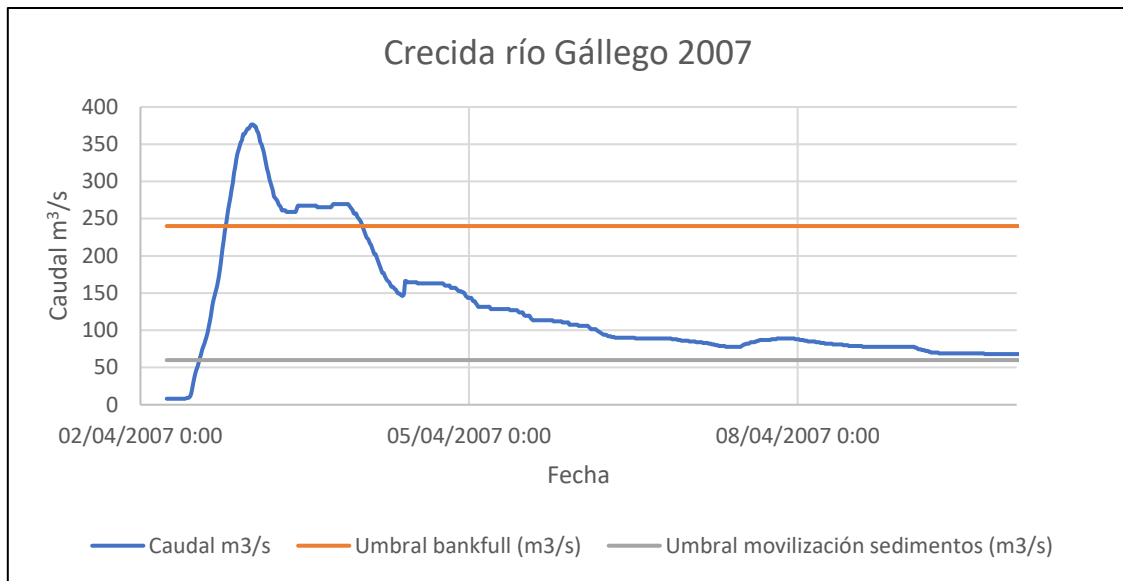


Figura 18: Hidrograma de crecida del año 2007 del río Gállego en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2007 se aprecia un único caudal máximo o punta de la crecida con lo cual se puede definir como simple.

Respecto a la duración, esta crecida sigue la línea de la mayor parte de las crecidas analizadas, es decir, crecidas con un periodo de tiempo de duración corto. En este caso se estima en unos 8 días aproximadamente.

Por tramos de la gráfica, la crecida se puede dividir en tres tramos. El primero de los tramos presenta un rápido y homogéneo ascenso de caudal desde los $10 \text{ m}^3/\text{s}$ iniciales hasta los $380 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente que representan el caudal punta de la crecida. El segundo tramo consiste en un descenso pronunciado pero corto de caudal hasta permanecer estable superándose el umbral bankfull de $240 \text{ m}^3/\text{s}$. El último tramo consiste en un descenso en primera instancia rápido que se va suavizando en el tiempo hasta aproximarse al caudal de movilización de sedimentos ($60 \text{ m}^3/\text{s}$) cuando se da por finalizada la crecida.

Como último aspecto, caben mencionar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, se supera durante el pico de la crecida durante un día y medio aproximadamente. El umbral de movilización de sedimentos tiene una duración estipulada de 7 días y medio siendo muy similar a la duración total de la crecida en su conjunto.

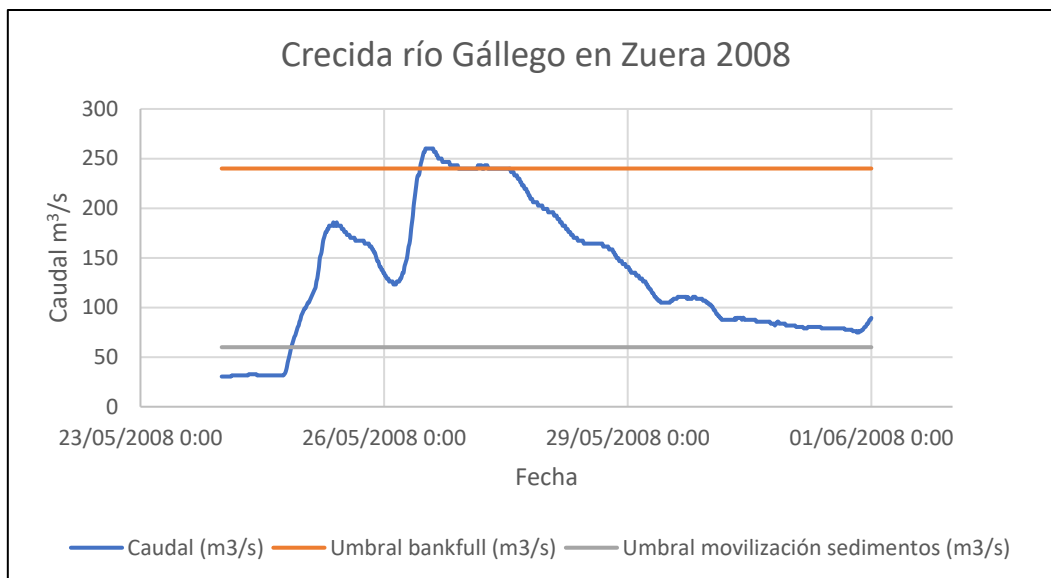


Figura 19: Hidrograma de crecida del año 2008 del río Gállego en Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2008 se aprecian varios caudales máximos o punta de la crecida con lo cual se puede definir como compleja. Tan solo uno de los dos caudales máximos supera el umbral bankfull con un caudal que supera los $240 \text{ m}^3/\text{s}$.

En relación con la duración, esta crecida sigue la tendencia de las crecidas previas, es decir, una semana de duración aproximadamente.

Por tramos de la gráfica, se pueden dividir en cuatro diferenciados. En primer lugar, un ascenso marcado de caudal desde valores inferiores al umbral de movilización de sedimentos con caudales de unos $30 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta alcanzar los $180 \text{ m}^3/\text{s}$ del caudal máximo secundario de la crecida. En cualquier caso, todavía no se alcanzan los $240 \text{ m}^3/\text{s}$ que marcan el umbral bankfull. El segundo tramo se caracteriza por un corto descenso de caudal desde esos $180 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta valores de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. A pesar de este puntual descenso, se sigue con caudales muy por encima del umbral de movilización de sedimentos. El tercer tramo consiste en otro ascenso importante de caudal. En esta ocasión se superan ligeramente los $240 \text{ m}^3/\text{s}$ con un caudal máximo de $256 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. Tras alcanzar este caudal se da un periodo en el que se produce poca oscilación y la crecida entra en fase de meseta superándose en todo momento el umbral bankfull. A partir de este momento se entraría en el cuarto tramo donde va descendiendo paulatinamente el caudal hasta llegar a valores próximos al umbral de movilización de sedimentos.

Por último, cabe destacar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, se supera durante la punta principal de la crecida en torno a un día y medio aproximadamente. Respecto al umbral de movilización de sedimentos se supera durante un periodo de tiempo más prolongado (una semana aproximadamente).

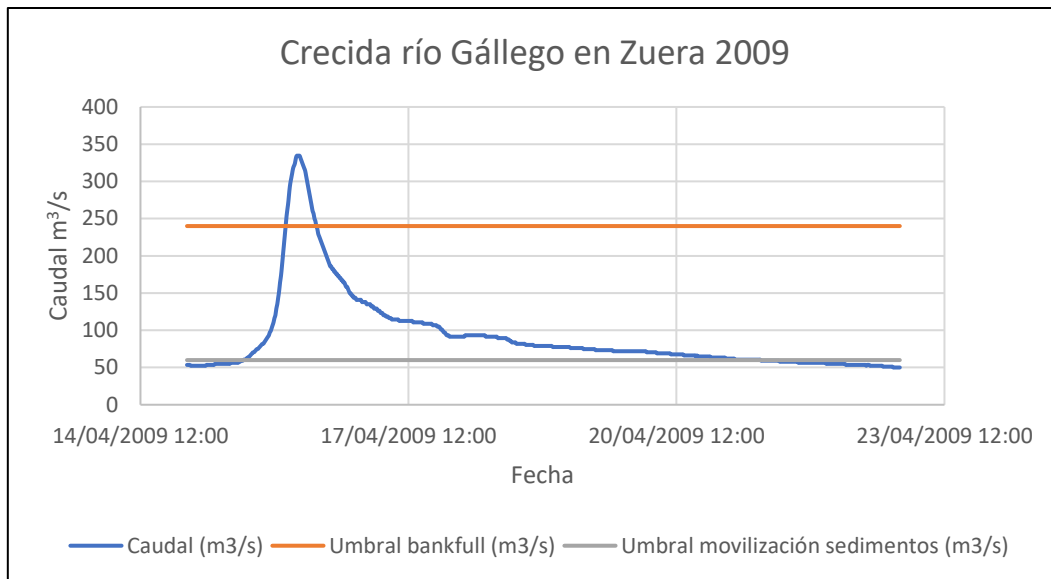


Figura 20: Hidrograma de crecida del año 2009 del río Gállego en Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2009 se aprecia un único caudal máximo o punta de la crecida. Esto permite caracterizar la crecida como simple. Además, se observa una rápida respuesta hidrológica (marcado ascenso en un corto espacio de tiempo).

En relación con la duración, es muy similar a la expuesta en crecidas previas. En este caso concreto se estima que es de unos 9 días aproximadamente. Se ajusta de esta manera a la media que está entre 7-8 días aproximadamente.

Por tramos de la gráfica, se pueden dividir en dos diferenciados al ser una crecida simple. El primer tramo consiste en un súbito ascenso de caudal desde valores próximos al umbral de movilización de sedimentos ($60 \text{ m}^3/\text{s}$) hasta superar de manera holgada los $240 \text{ m}^3/\text{s}$ que suponen el umbral bankfull. En esta crecida se alcanzan los $330 \text{ m}^3/\text{s}$. El segundo tramo se caracteriza por un rápido descenso desde esta punta de caudal (poca prolongación temporal) hasta valores de unos $100 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de este momento, se produce un descenso más constante y lento hasta situarse en los valores previos a la crecida y, por tanto, por debajo del umbral de movilización de sedimentos.

Por último, caben destacar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, tan solo se supera de manera efímera en el momento en que se da el caudal punta. A pesar de que se supera de manera clara, se da durante un periodo de tiempo de escasas horas. En relación con el umbral de movilización de sedimentos se supera durante prácticamente toda la crecida, es decir, tiene una duración temporal aproximada de 7 días.

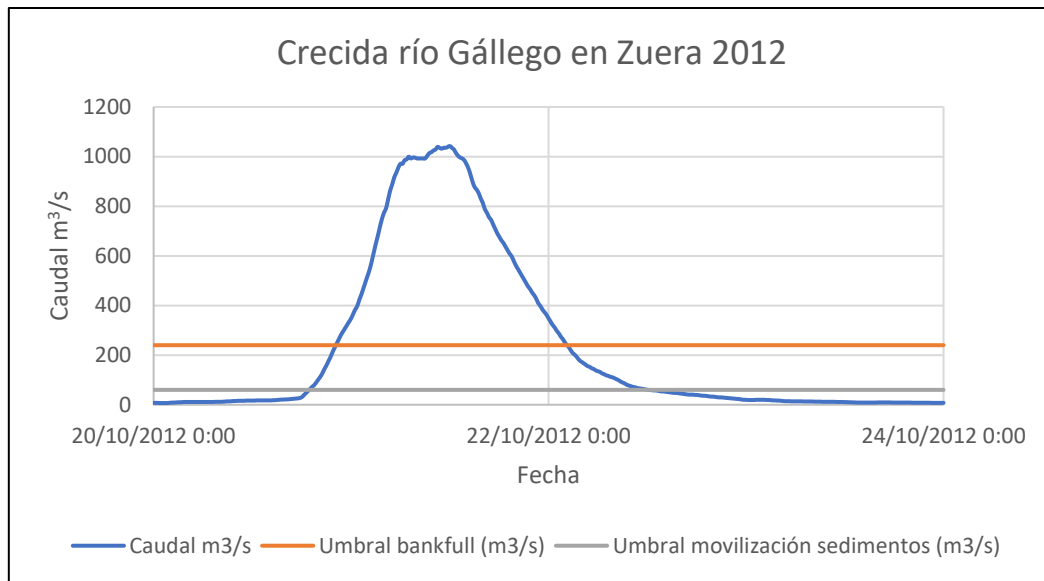


Figura 21: Hidrograma de crecida del año 2012 del río Gállego en Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2012 se observa la existencia de un único pico de caudal punta por lo que se caracteriza por ser simple.

En relación a la duración, es una crecida breve con una duración aproximada de dos días. Se caracteriza además por presentar una respuesta hidrológica rápida (ascenso y descenso abrupto de caudal).

Por tramos de la gráfica, la crecida responde al prototipo de una crecida simple. De esta forma, se aprecian dos tramos bien diferenciados (ambos con una evolución de caudales similar). El primer tramo consiste en un súbito aumento de caudal desde valores próximos a $0 \text{ m}^3/\text{s}$ a hasta superar los $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ en un corto periodo de tiempo (respuesta hidrológica rápida como se ha mencionado previamente). El último tramo se caracteriza por un fuerte descenso de caudal desde el pico de la crecida ($>1000 \text{ m}^3/\text{s}$) hasta valores próximos a $0 \text{ m}^3/\text{s}$ presentando un comportamiento similar al tramo de ascenso de caudal (el descenso también es repentino y en un corto lapso de tiempo).

Como último aspecto para comentar entran los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto del primero se supera con holgura durante el pico de la crecida. Sin embargo, el periodo de tiempo en el que se supera es breve y se estima en 1 día aproximadamente. Respecto del umbral de movilización de sedimentos se supera durante 1 día y medio, con una duración similar a la crecida en su conjunto.

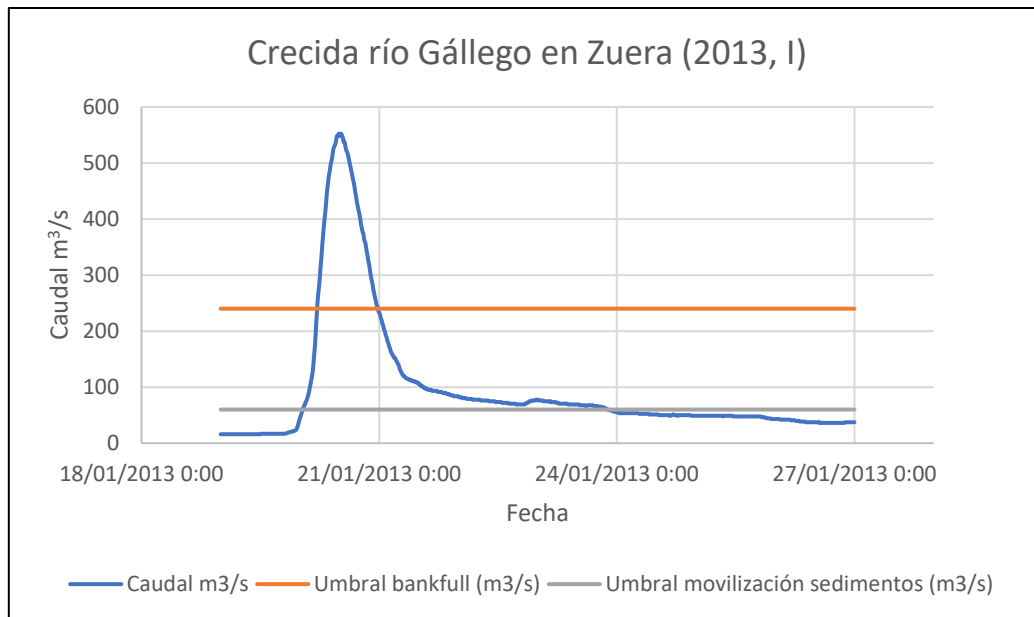


Figura 22: Hidrograma de crecida del año 2013 (I) del río Gállego en Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de (2013, I) se observa al igual que en la crecida precedente un único pico de caudal. De esta forma, se puede catalogar la crecida de carácter simple.

Respecto a la duración es de unos 5 días aproximadamente (ligeramente superior a la anterior crecida) con unas características similares a la de 2012 (ascenso y descenso bruscos de caudal con una respuesta hidrológica rápida).

Por tramos de la gráfica, al igual que en la crecida precedente se observan dos tramos bien diferenciados al tratarse de una crecida simple. El primer tramo responde a un súbito ascenso de caudal desde valores próximos a los $15 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta superar los $500 \text{ m}^3/\text{s}$ todo ello en un corto periodo temporal. El último tramo responde a un rápido descenso de caudal desde el pico de la crecida hasta valores próximos a los $60 \text{ m}^3/\text{s}$ que es cuando se produce un estacionamiento y poca variación del caudal.

Como último aspecto caben destacar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto del umbral bankfull se supera durante unas 20 horas mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante un periodo de 4 días aproximadamente.

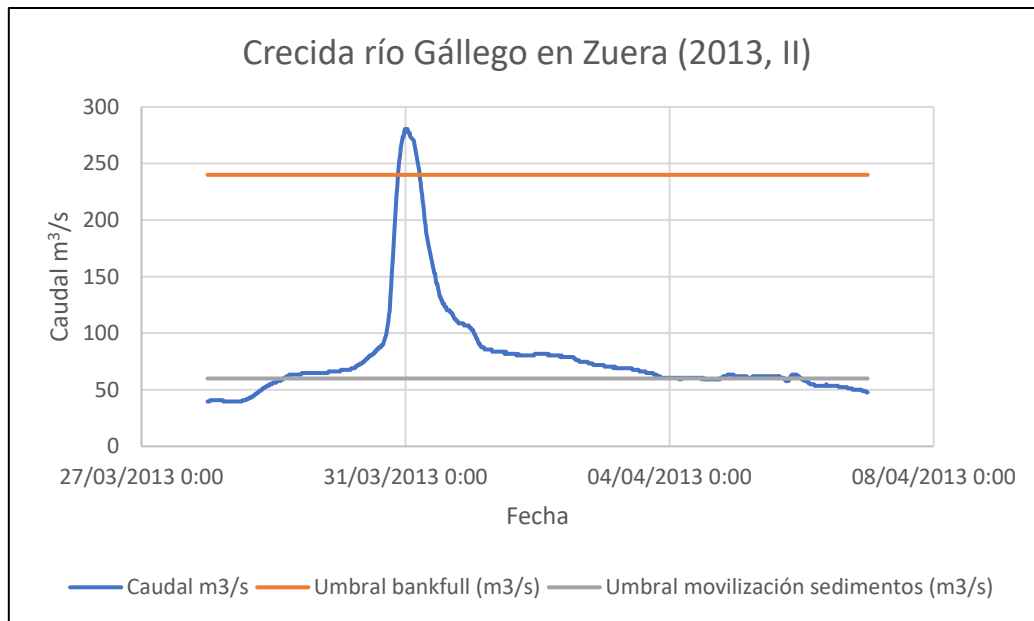


Figura 23: Hidrograma de crecida del año 2013 (II) del río Gállego en Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de (2013, II) se aprecia al igual que en las dos precedentes un único caudal máximo o punta de la crecida. Por tanto, se puede catalogar como simple.

Analizando la duración, a pesar de ser simple se extiende temporalmente más que las 2 anteriores. Esta crecida tiene una duración estimada de unos 10 días y tiene características similares a las anteriormente descritas (ascenso y descenso brusco de caudal con una rápida respuesta hidrológica).

Por tramos de la gráfica, al igual que en las 2 crecidas previas se divide la crecida en 2 tramos bien diferenciados. El primer tramo consiste en un súbito ascenso de caudal desde valores próximos al umbral de movilización de sedimentos hasta alcanzar los $280 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente y superando el umbral bankfull. Todo ello en un breve espacio de tiempo. El último tramo tiene características similares al primero. Este tramo se caracteriza por un rápido descenso de caudal desde el pico de la crecida hasta valores próximos a los $60 \text{ m}^3/\text{s}$ que marcan el umbral de movilización de sedimentos.

Por último, caben destacar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. El primero se supera durante poco tiempo, estimándose una duración temporal de 6 horas aproximadamente. El umbral de movilización de sedimentos se supera durante un mayor periodo de tiempo, estimándose en unos 5 días aproximadamente.

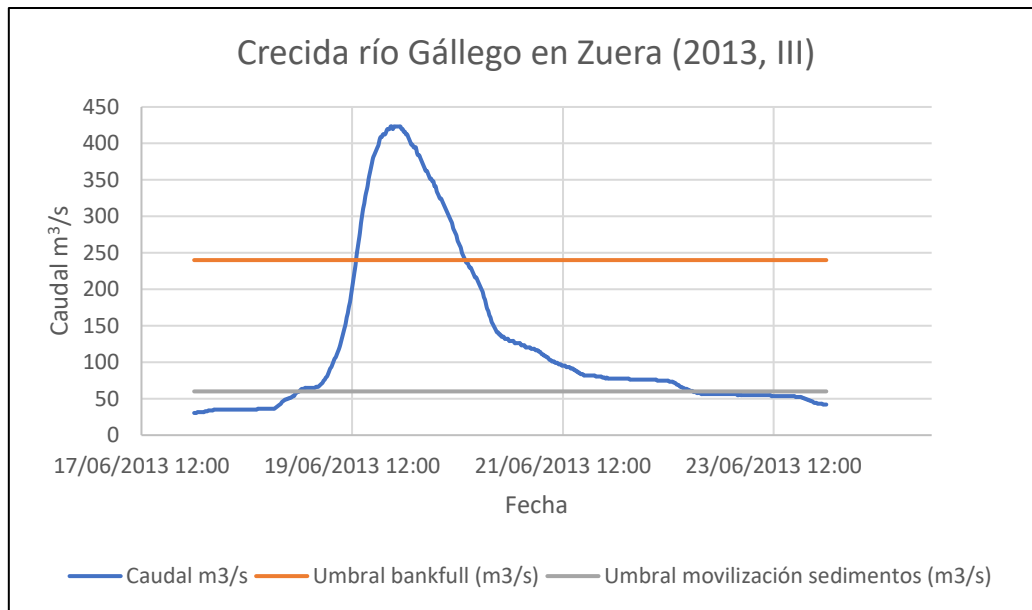


Figura 24: Hidrograma de crecida del año 2013 (III) del río Gállego en Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de (2013, III) también se observa un único pico de caudal punta. Esto quiere decir que se puede catalogar la crecida como simple.

Respecto a la duración, es similar a la de la mayor parte de crecidas. En este caso la duración se estima en unos 6 días siendo un valor similar al de la mayor parte de las crecidas comentadas y con características similares en relación con el ascenso y el descenso del caudal.

Analizando los tramos de la gráfica, se puede dividir la crecida en dos tramos diferenciados con características similares (prototipo de una crecida simple). El primero de los tramos consiste en un súbito ascenso de caudal desde valores próximos al umbral de movilización de sedimentos hasta superar los $400 \text{ m}^3/\text{s}$ del pico de la crecida. El segundo tramo se inicia con un fuerte descenso de caudal que se va ralentizando hasta llegar a valores próximos a los $60 \text{ m}^3/\text{s}$. En ese momento se produce un estancamiento hasta el final de la crecida donde desciende ligeramente por debajo de los $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por último y haciendo referencia a los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos hay que destacar el periodo de tiempo en que ambos se superan. En relación con el umbral bankfull solo se supera en el momento en que se da el caudal máximo de la crecida. Se estima que el umbral bankfull se supera durante 24 horas completas mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante 3 días y medio aproximadamente.

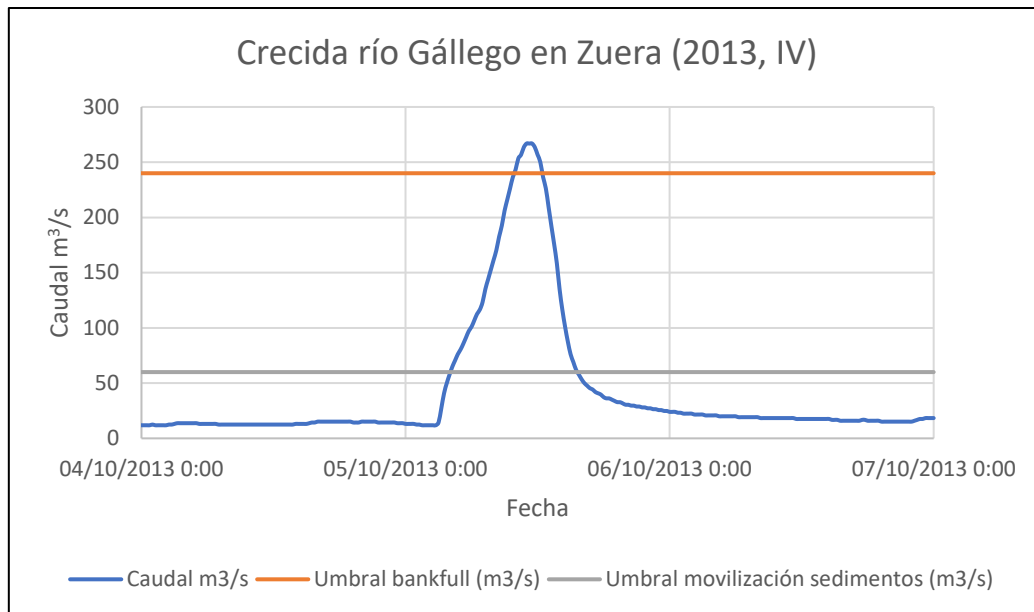


Figura 25: Hidrograma de crecida del año 2013 (IV) del río Gállego en Zuera. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de (2013, IV) (al igual que todas las anteriores que se dan durante el mismo año) se aprecia un único caudal punta o máximo de la crecida. Esto permite catalogar dicha crecida como simple.

En relación a la duración, es menor que la crecida precedente. Se estima que la duración de la crecida es de 1 día y pocas horas lo cual es síntoma de que presenta una respuesta hidrológica rápida y efímera. Se observa además un rápido ascenso y descenso de caudal (características semejantes a las crecidas precedentes).

Analizando la gráfica por tramos, se aprecia que esta crecida se puede diferenciar en dos tramos bien marcados con características similares en ambos. El primero de los tramos consiste en un marcado ascenso de caudal desde los $12 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta superar los $250 \text{ m}^3/\text{s}$ y por ende el umbral bankfull (establecido en $240 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Gállego). El segundo tramo presenta similares características produciéndose un descenso abrupto de caudal hasta valores ostensiblemente inferiores al umbral de movilización de sedimentos.

Por último, caben mencionar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, se supera durante un corto periodo temporal tras alcanzarse el caudal máximo de la crecida. Este periodo de tiempo está estimado en 2 horas y media aproximadamente. El umbral de movilización de sedimentos se supera durante un mayor periodo temporal. Está estimado que este umbral se supera durante unas 12 horas aproximadamente, es decir, durante la mitad de tiempo que dura la crecida en su conjunto.

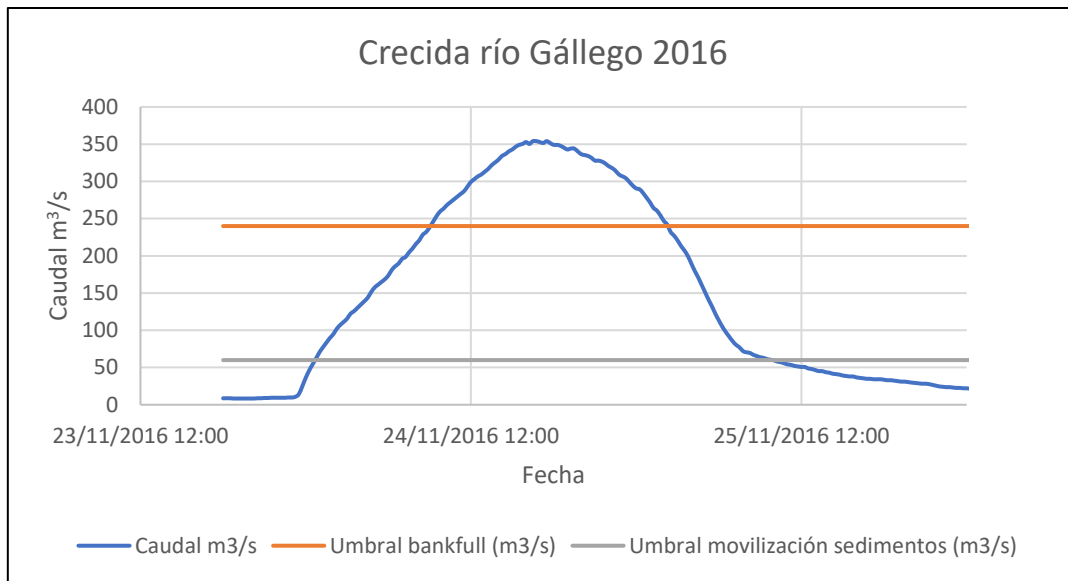


Figura 26: Hidrograma de crecida del año 2016 del río Gállego en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Esta crecida de 2016 presenta unas características muy similares a la mayoría de crecidas analizadas de este sistema fluvial. Esto se traduce en la existencia de un único caudal punta o máximo de la crecida y de esta forma estar catalogada como simple.

En relación con la duración sigue la línea de las anteriores, es decir, poco periodo temporal. En este caso se habla de una duración aproximada de un día y medio aproximadamente. Además, se aprecia un rápido ascenso y descenso de caudal al igual que en la mayoría de crecidas previamente analizadas.

Analizando la gráfica por tramos, se puede observar que la crecida tiene dos tramos bien diferenciados con similares características. El primer tramo responde a una rápida respuesta hidrológica con un fuerte ascenso de caudal pasando de los $11 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente hasta superar ligeramente los $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto se produce en un corto periodo de tiempo. El último tramo se caracteriza por un rápido descenso de caudal desde la punta de la crecida hasta valores similares a los previos de la crecida.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en el que se superan tanto el umbral bankfull como el de movilización de sedimentos. Respecto del primero, se supera en el momento en que se da el caudal máximo de la crecida. Traducido a tiempo se estima que dicho umbral se supera ininterrumpidamente durante 17 horas. Respecto del umbral de movilización de sedimentos se supera durante un periodo de tiempo de 1 día y medio aproximadamente.

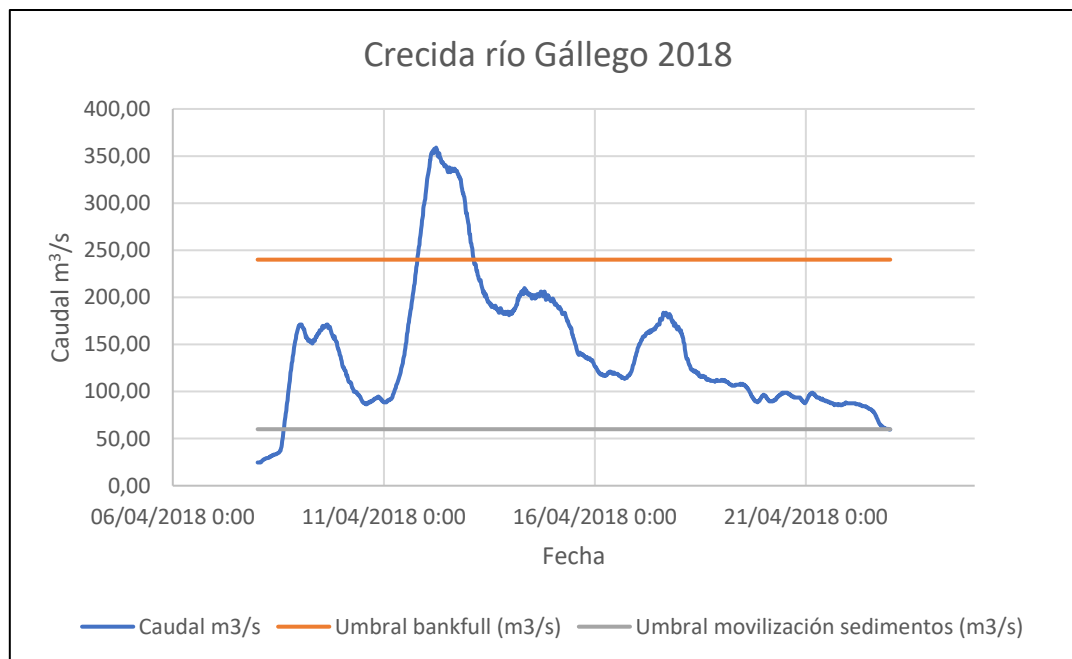


Figura 27: Hidrograma de crecida del año 2018 del río Gállego en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . En esta crecida de 2018 se observan notorias diferencias respecto de la mayoría de crecidas analizadas hasta la fecha. Se aprecian numerosos picos de caudal máximo (principal y secundarios) y una estructura totalmente diferente de la gráfica. Esta crecida tiene un carácter complejo.

Analizando la duración, el hecho de que sea una crecida compleja hace que sea mayor respecto de las anteriores. La duración de dicha crecida es de dos semanas aproximadamente y se aprecian además importantes vaivenes de caudal a diferencia de las crecidas previas donde la variación de caudal seguía un patrón regular.

Por tramos de la gráfica, esta crecida se puede dividir en numerosos tramos al tener un carácter complejo. Se pueden llegar a identificar 8 tramos diferentes, que responden a ascensos y descensos de caudal en base a los 4 picos de caudal que se identifican (1 máximo y 3 secundarios). El primer tramo presenta un ascenso bastante regular de caudal desde valores entre los 25 y $170 \text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal de $170 \text{ m}^3/\text{s}$ se alcanza dos veces en este tramo. En este caudal máximo secundario no se alcanza el umbral bankfull de $240 \text{ m}^3/\text{s}$. En el segundo tramo se produce un descenso regular desde este caudal máximo secundario hasta valores cercanos a los $100 \text{ m}^3/\text{s}$ superándose holgadamente los $60 \text{ m}^3/\text{s}$ de umbral de movilización de sedimentos. El tercer tramo se caracteriza por un abrupto y regular ascenso de caudal desde los $90 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente hasta alcanzar el caudal máximo de la crecida establecido en unos $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (se supera el umbral bankfull). Del cuarto tramo se puede destacar un marcado descenso de caudal desde la punta de la crecida hasta valores de $180 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual indica que no desciende hasta valores previos al ascenso de caudal hasta la punta de la crecida. El quinto tramo no tiene mucha cosa a comentar salvo un corto ascenso de caudal desde los $180 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta valores próximos a $200 \text{ m}^3/\text{s}$ durante un pequeño periodo de tiempo. El sexto tramo responde a un descenso de caudal más marcado hasta valores de $110 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. El penúltimo tramo a analizar consiste en un último ascenso de caudal hasta el último pico secundario (rondando los $180 \text{ m}^3/\text{s}$). Este ascenso se produce *grosso modo* de forma constante. El último

tramo a analizar consiste en un descenso final de caudal desde el último pico secundario hasta valores próximos al umbral de movilización de sedimentos. Este descenso comienza de forma más abrupta hasta suavizarse conforme el caudal es menor.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo durante el que se superan los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. El umbral bankfull se supera solo durante el caudal máximo de la crecida en un periodo de tiempo de 30 horas aproximadamente. El umbral de movilización de sedimentos se supera durante prácticamente toda la crecida, por lo que se habla de unas dos semanas aproximadamente superándose de forma ininterrumpida.

3.1.3. Alto Matarraña (aforo de Beceite)

Este sistema fluvial presenta caudales irregulares con un marcado carácter mediterráneo. Su régimen estacional registra máximos en otoño y primavera coincidiendo con los periodos de mayor precipitación en la cuenca. Las crecidas son generalmente simples, con una única punta de caudal, y rápidas, de corta duración. Las más destacadas son consecuencia de lluvias intensas y pueden asociarse a situaciones de DANA, siendo el ejemplo más claro de ello la crecida del año 2000.

En el periodo estudiado, desde 1997, ha habido 10 crecidas que han superado el caudal bankfull, la mitad primaverales (en marzo o mayo) y la mitad otoñales (entre octubre y diciembre).

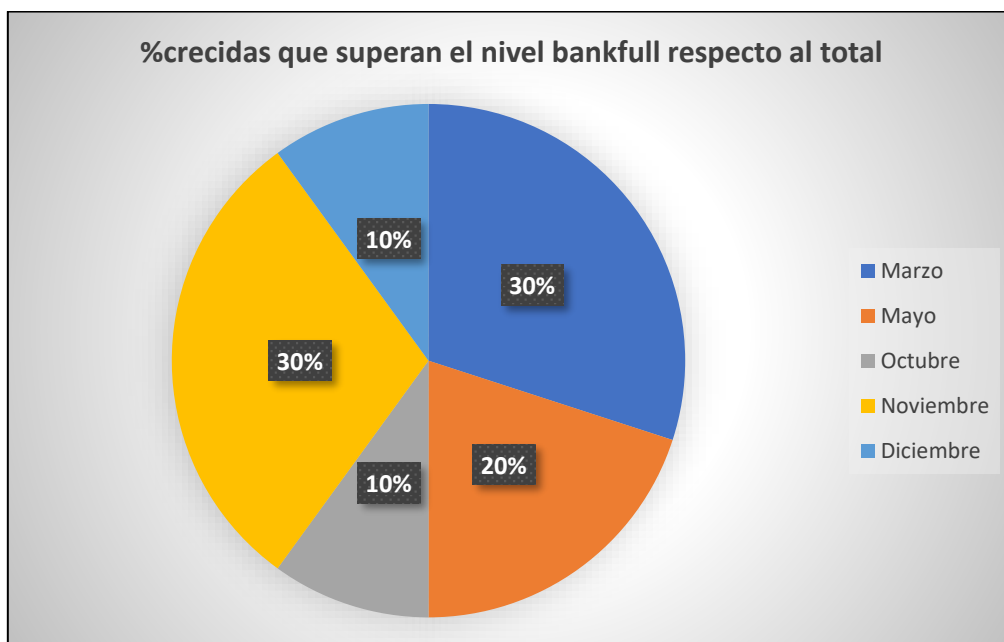


Figura 28: Distribución por meses de las crecidas que superan el nivel bankfull en el aforo del río Matarraña en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH.

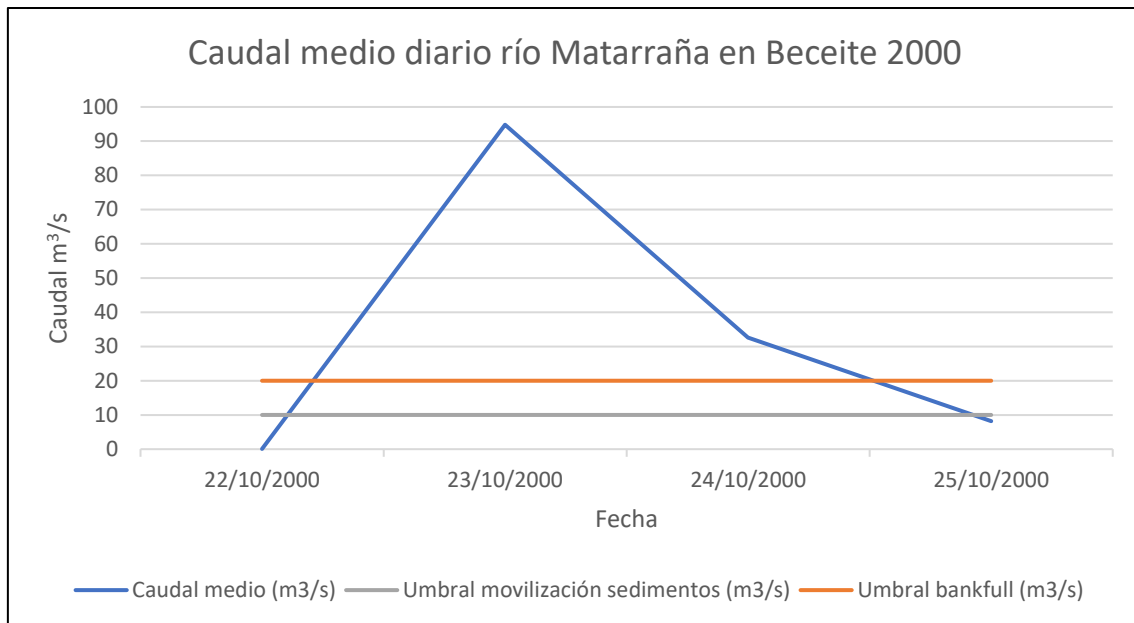


Figura 29: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2000 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2000 se aprecia un único pico de caudal con lo que nos encontramos ante una crecida de índole simple.

Respecto a la duración (como se va a poder ver a lo largo de todas las crecidas de este sistema fluvial) esta crecida es corta. Apenas dura 2-3 días desde el inicio hasta el fin y se caracteriza por una rápida respuesta hidrológica.

Por tramos de la gráfica, esta crecida se puede dividir en dos tramos bien diferenciados. El primero de ellos consiste en un ascenso súbito de caudal desde valores de caudal medio próximos a $0 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta valores que superan los $90 \text{ m}^3/\text{s}$ y el umbral bankfull que para este sistema fluvial está establecido en $20 \text{ m}^3/\text{s}$. El segundo tramo consiste en un descenso marcado de caudal hasta valores inferiores al umbral de movilización de sedimentos, que para este sistema fluvial está establecido en $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en el que se superan tanto el umbral bankfull como el de movilización de sedimentos. En relación con el primero, se observa que se supera aproximadamente durante 2 días y medio, mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante 3 días *grosso modo*.

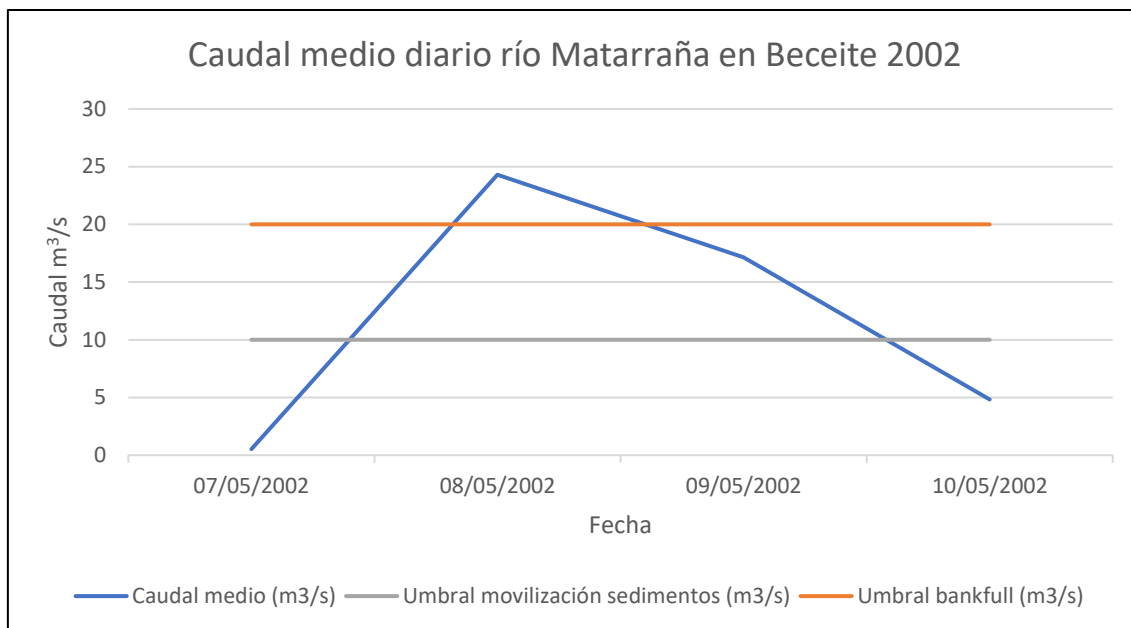


Figura 30: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2002 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2002 al igual que en la anterior se aprecia un único pico de caudal punta, por lo que se cataloga como crecida simple.

En relación a la duración, presenta características similares a la anterior crecida del año 2000. Por tanto, se aprecia una duración estimada de la crecida de unos 3 días desde el inicio hasta el final, aunque la respuesta hidrológica es sensiblemente más lenta.

Por tramos de la gráfica, se puede dividir la crecida en dos tramos marcados. El primero de los tramos hace referencia a un rápido ascenso de caudal (respuesta hidrológica rápida) con valores de caudal medio que van de casi los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta superar ligeramente el umbral bankfull con valores de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. El segundo tramo responde a un descenso de caudal menos marcado que el ascenso precedente. Este descenso comienza de manera más o menos lenta hasta valores de caudal medio de $17 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir de este momento, se inicia un descenso más rápido hasta valores de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, y por tanto por debajo del umbral de movilización de sedimentos.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en que se superan el umbral bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, se supera durante menos de un día completo, mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante 2 días y medio aproximadamente.

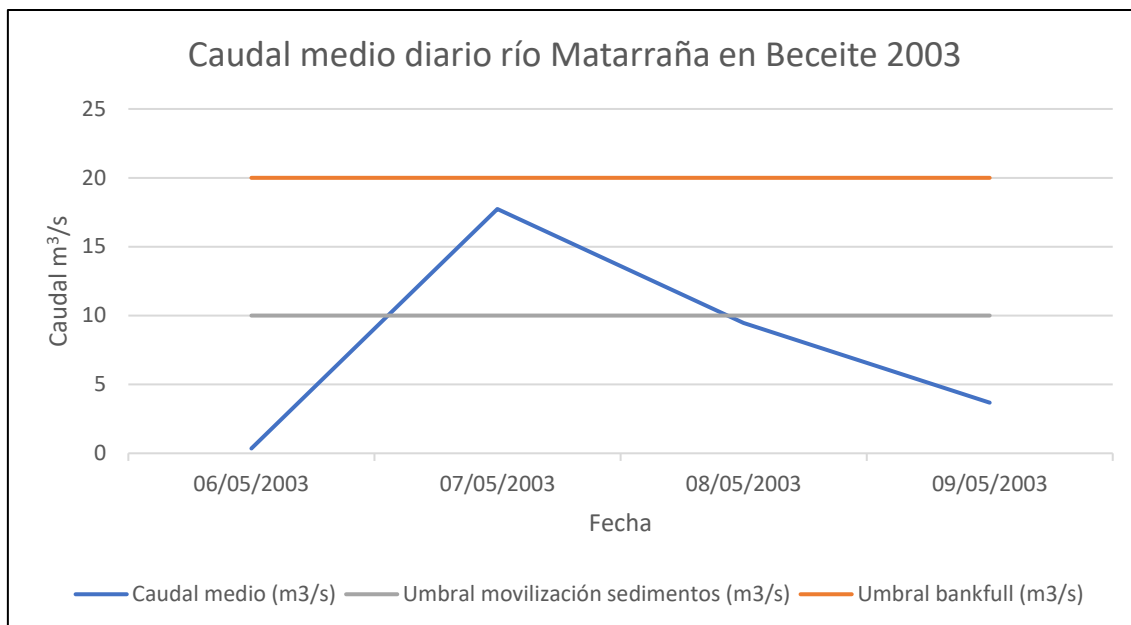


Figura 31: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2003 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2003 se aprecia también un único pico de caudal punta, por lo que es una crecida de carácter simple.

Respecto a la duración, sigue la misma línea que las dos crecidas precedentes descritas. Esto se traduce en que es una crecida de corta duración rondando aproximadamente los 3 días y con una respuesta hidrológica rápida.

Por tramos de la gráfica, la crecida se puede dividir en dos partes claramente identificables. En el primer tramo se puede apreciar un marcado ascenso de caudal (rápida respuesta hidrológica mencionada previamente) desde prácticamente los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio hasta aproximadamente los $17\text{-}18 \text{ m}^3/\text{s}$, y por tanto superando con creces el umbral de movilización de sedimentos. En el último tramo se aprecia un descenso de caudal marcado, pero más paulatino que el previo ascenso hasta el caudal medio máximo. El caudal desciende desde los $17\text{-}18 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta los $3\text{-}4 \text{ m}^3/\text{s}$. Como aspecto importante cabe destacar que en ningún momento de la crecida el caudal medio supera el umbral bankfull. Sin embargo, esta crecida se ha seleccionado porque viendo los caudales máximos instantáneos sí que se superan ligeramente esos $20 \text{ m}^3/\text{s}$ de umbral.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en que se superan los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos. En relación con el primero, como se ha explicado en el párrafo precedente no se llega a superar en ningún momento de la crecida (atendiendo a la gráfica que expresa caudales medios diarios). Respecto al umbral de movilización de sedimentos se supera durante aproximadamente un día y medio.

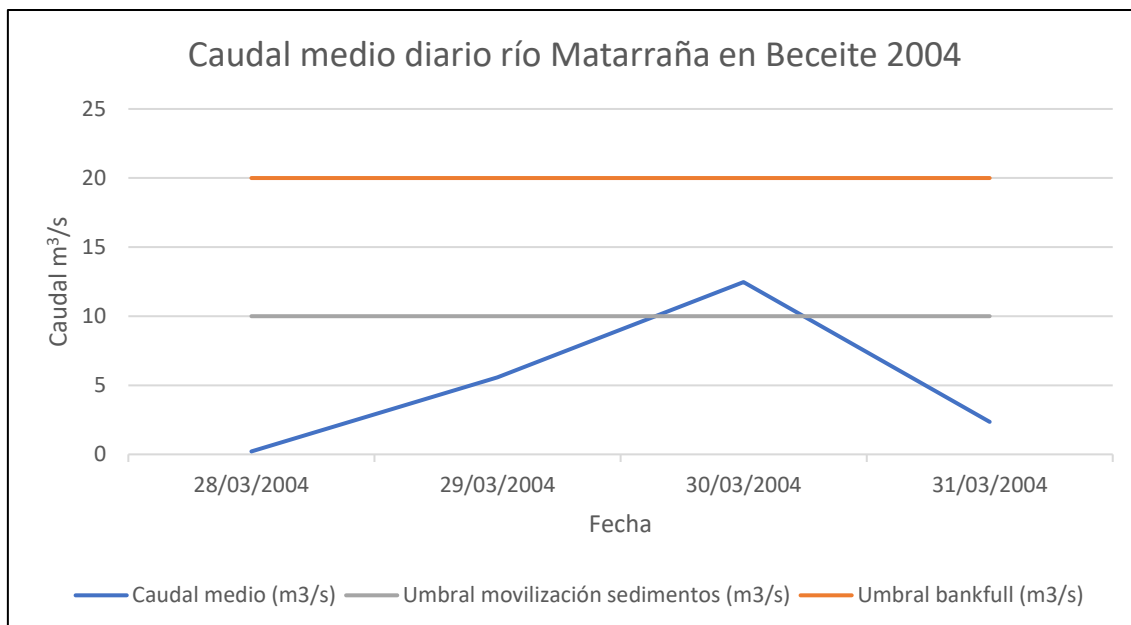


Figura 32: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2004 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2004 se aprecia también un único pico de caudal punta. Por tanto, esta crecida se puede catalogar con un carácter de simple.

Respecto a la duración, se sigue la línea inicial de crecidas con escasa duración temporal. Traducido a días se observa que se prolonga aproximadamente durante 3 días. Se observa como novedad una respuesta hidrológica más lenta y un ascenso de caudal más lento.

Por tramos de la gráfica, se diferencian dos partes de la crecida. En primer lugar, un ascenso de caudal con un carácter más paulatino que en crecidas precedentes. Esto se traduce en que el caudal medio va desde los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente hasta llegar aproximadamente a los $12\text{-}13 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto da muestras de un ascenso de caudal más lento y progresivo a diferencia de crecidas previas. El segundo y último tramo consiste en un descenso rápido de caudal desde esos valores de caudal medio de $12\text{-}13 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta los $2\text{-}3 \text{ m}^3/\text{s}$. Al igual que en la crecida precedente no se supera en ningún momento el umbral bankfull y el umbral de movilización de sedimentos se supera momentáneamente (en términos de caudal medio). Esta crecida se ha seleccionado porque en lo referente a caudales máximos instantáneos supera el umbral bankfull de $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por último, cabe destacar el tiempo en que se superan tanto el umbral bankfull como el de movilización de sedimentos. El primero como se ha comentado previamente no se supera en términos de caudal medio durante la crecida, mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante un periodo de tiempo que no llega al día completa.

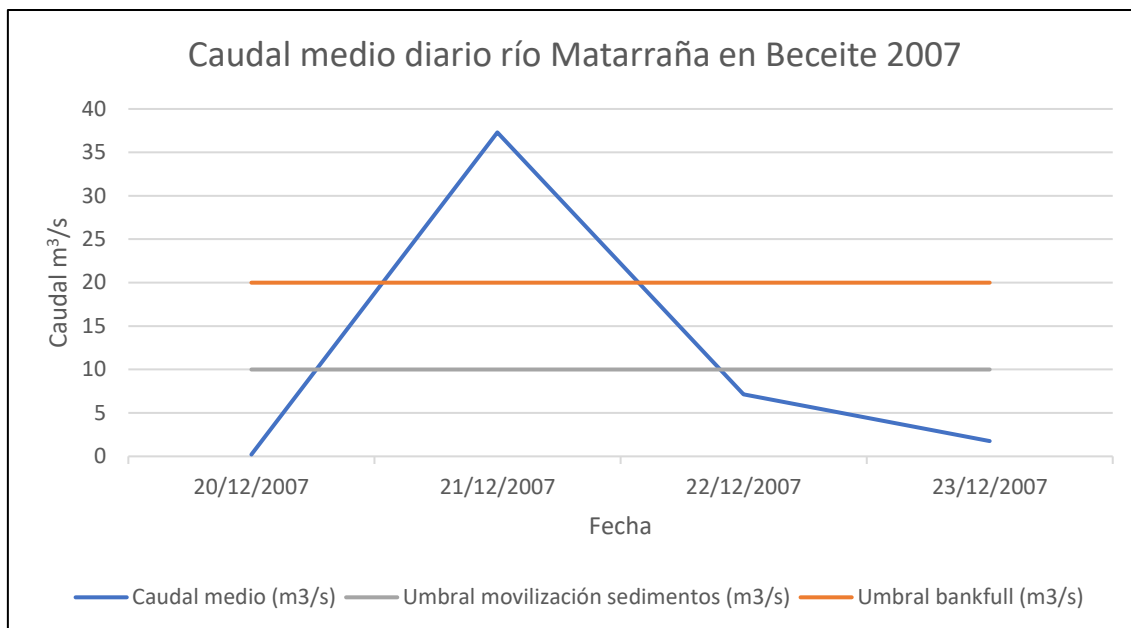


Figura 33: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2007 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2007 se aprecia como es la tónica general de las crecidas un único pico de caudal punta. Esto se traduce en que la crecida se caracteriza por ser simple.

En relación a la duración no se aprecian variaciones respecto a las anteriormente descritas. Esto se traduce en una corta duración temporal y en un periodo de tiempo de 3 días aproximadamente. Se aprecia además una rápida respuesta hidrológica con caudales medios que en esta ocasión superan el umbral bankfull.

Por tramos de la gráfica, se distinguen dos partes a lo largo de la crecida. El primer tramo responde a un ascenso marcado de caudal con una rápida respuesta hidrológica. Este ascenso va desde los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio hasta los $36\text{-}37 \text{ m}^3/\text{s}$ (se supera con holgura el umbral bankfull). El segundo tramo responde a un descenso marcado de caudal que se ralentiza tras bajar del umbral de movilización de sedimentos. El caudal medio pasa de esos $36\text{-}37 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente hasta los $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en que se superan el umbral bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto del primero se supera ampliamente con una duración continuada de 1 día y medio aproximadamente. En relación con el umbral de movilización de sedimentos se estima una duración de 2 días aproximadamente. A diferencia de otras crecidas la diferencia temporal entre los umbrales es menos marcada y se aproxima bastante.

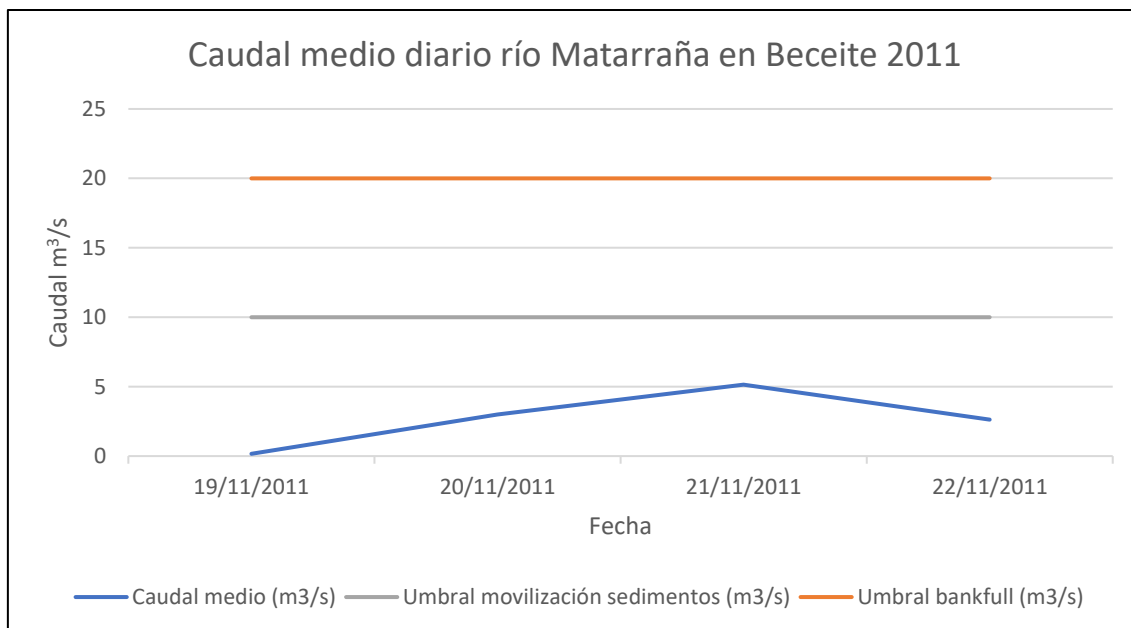


Figura 34: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2011 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2011 se aprecia también un único pico de caudal punta, por lo que es una crecida de carácter simple.

En relación a la duración, no se observan diferencias respecto del resto de crecidas comentadas. Esto se traduce en crecidas cortas de unos 3 días de duración. La principal diferencia radica en la respuesta hidrológica que se puede catalogar como lenta con un ascenso de caudal muy aplanado.

Por tramos de la gráfica, se pueden diferenciar dos tramos en la crecida. El primer tramo se caracteriza por un ascenso de caudal muy suave y aplanado desde los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta los $5 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio. El segundo tramo se caracteriza por un descenso muy suave de caudal desde los $5 \text{ m}^3/\text{s}$ iniciales del pico de caudal medio hasta los $2\text{-}3 \text{ m}^3/\text{s}$ del final de la crecida. La peculiaridad de esta crecida frente a las previamente analizadas es el poco caudal medio existente. En ningún momento se supera el umbral bankfull (ya se ha observado en otras crecidas), pero en esta tampoco se supera el umbral de movilización de sedimentos. Todos estos datos hay que saber entender que hacen referencia a caudales medios. Esta crecida se ha seleccionado teniendo en cuenta que el caudal máximo instantáneo supera los $20 \text{ m}^3/\text{s}$ del umbral bankfull y por tanto tiene interés de cara a la aplicación de los índices TG y PC de cara a la gestión del riesgo.

Por último, cabe destacar el tiempo en que se superan el umbral bankfull y de movilización de sedimentos. Como se ha mencionado previamente en ambos casos es de 0. Esto se explica por estar trabajando con caudales medios diarios y no con caudales máximos instantáneos. Es la primera crecida de las hasta ahora analizadas en que se da este hecho.

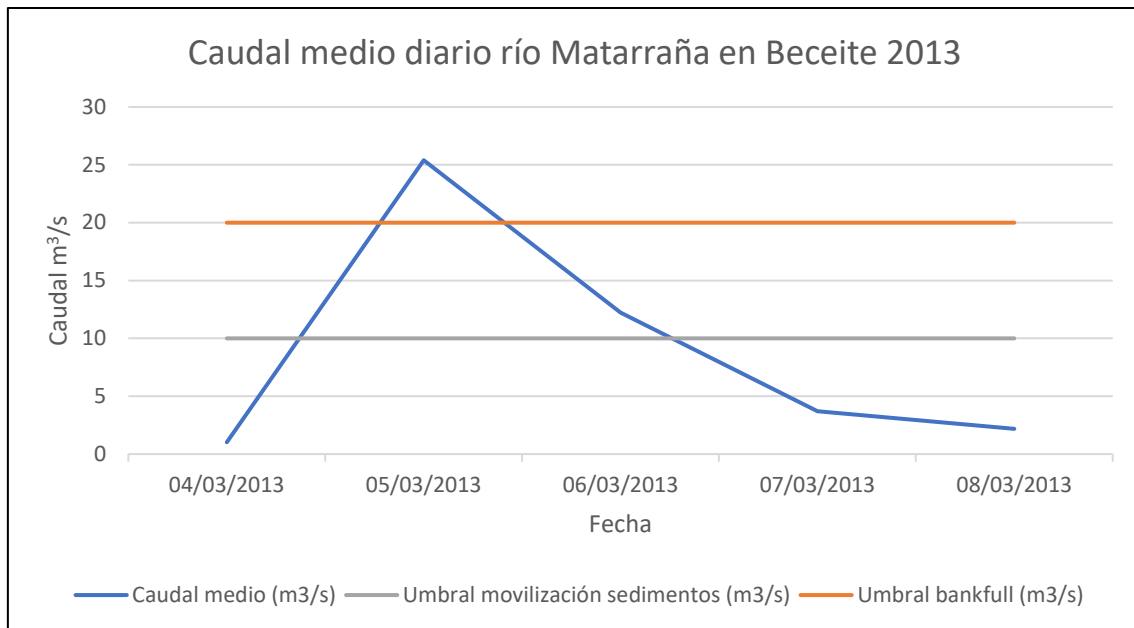


Figura 35: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2013 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2013 (como es la tónica general de las crecidas analizadas de este sistema fluvial) se aprecia un único pico de caudal punta. Esto permite catalogarla con el carácter de simple.

En relación a la duración, no se aprecian diferencias notorias respecto a las crecidas precedentes, si bien se observa que esta crecida se prolonga ligeramente más temporalmente hasta aproximadamente 4 días (en detrimento de los 3 días que se observan en crecidas previas). Además, se vuelven a superar los umbrales bankfull y de movilización de sedimentos en el momento de mayor caudal con una respuesta hidrológica rápida.

Por tramos de la gráfica, el hecho de que sea una crecida simple permite diferenciar dos tramos marcados. El primer tramo responde a un marcado ascenso de caudal medio desde los $0-1 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta llegar a los $25 \text{ m}^3/\text{s}$ superando el umbral bankfull. El segundo tramo responde a un descenso marcado de caudal medio que se va ralentizando conforme el caudal es menor. Este descenso va desde los $25 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio hasta los $4 \text{ m}^3/\text{s}$, momento en el que el descenso se suaviza de manera importante.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en que se superan el umbral bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto al primero, se supera durante medio día aproximadamente, mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante un día y medio aproximadamente.

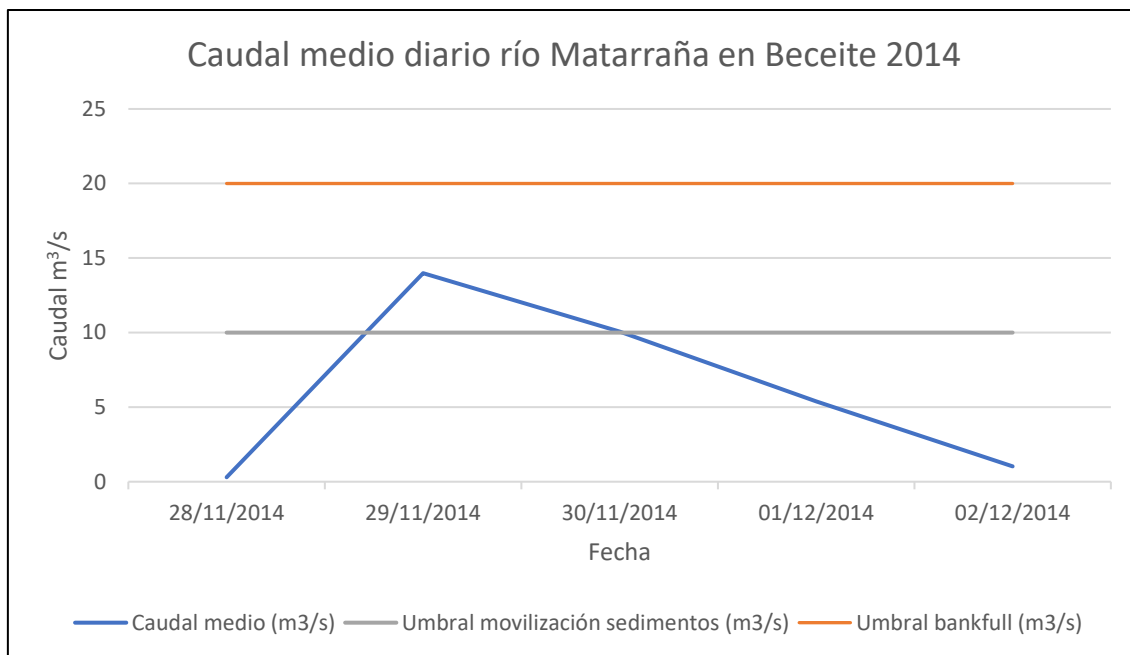


Figura 36: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2014 en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de 2014, se aprecia de nuevo la existencia de un único pico de caudal punta. Esto quiere decir que la crecida se puede catalogar como simple.

En relación a la duración, se sigue en la misma línea de todas las crecidas analizadas. Esto quiere decir que es una crecida corta de una duración estimada de 3-4 días desde el comienzo en el ascenso de caudal hasta el momento en que el descenso se estabiliza. Además, se produce una rápida respuesta hidrológica, aunque no se supera el umbral bankfull.

Por tramos de la gráfica, se observa que existen dos partes claramente diferenciadas (característica común de las crecidas con carácter simple). El primer tramo consta de un ascenso marcado de caudal con rápida respuesta hidrológica desde los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio hasta los $15 \text{ m}^3/\text{s}$. El segundo tramo de la gráfica responde a un marcado descenso de caudal, aunque menor que el ascenso proporcionalmente. Este descenso va desde los $15 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio hasta aproximadamente valores de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Otro aspecto que se puede observar es que en ningún momento se supera el umbral bankfull. No obstante, hay que entender que esto es debido a trabajar con datos de caudal medio y no con caudales máximos instantáneos. Esta crecida se ha seleccionado porque el caudal máximo instantáneo registrado supera el umbral bankfull establecido en $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en que se superan el umbral bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto al primero como se ha mencionado en el anterior párrafo no se supera en ningún momento de la crecida (en términos de caudal medio), mientras que el umbral de movilización de sedimentos se supera durante un día y medio aproximadamente.

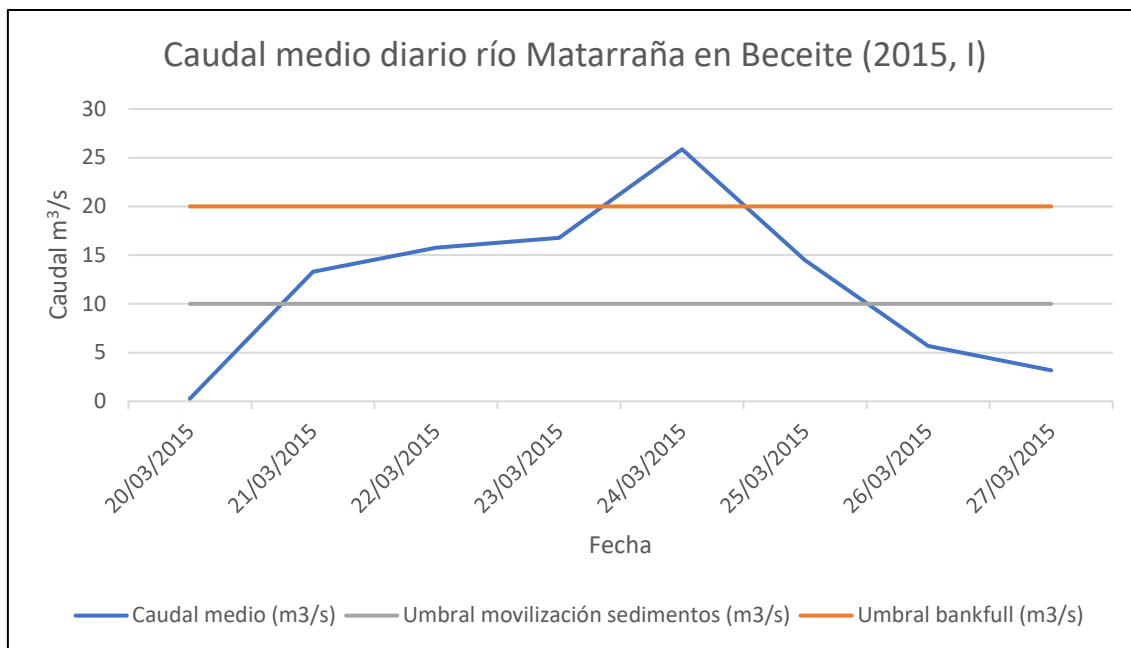


Figura 37: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2015 (I) en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de (2015, I) se aprecian algunas diferencias respecto a las anteriormente analizadas. Por un lado, se pueden llegar a diferenciar dos picos de caudal punta, por lo que esta crecida se puede catalogar de compleja. Otro aspecto es la duración (tratado a continuación).

Respecto a la duración, se observan diferencias marcadas respecto a la totalidad de crecidas previas analizadas. Si la media de duración de las crecidas estaba establecida en unos 3-4 días aproximadamente, en este caso la duración llega aproximadamente hasta una semana. Esto es debido fundamentalmente a que tiene un carácter complejo como se ha explicado en el párrafo previo.

Por tramos de la gráfica, se observan 3 partes diferenciadas al tener la crecida un carácter complejo. El primer tramo responde a un ascenso marcado de caudal hasta un estancamiento en torno a los $17\text{-}18 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio y primer pico de caudal de la crecida. El segundo tramo consiste en un ascenso también de caudal hasta llegar al pico principal de la crecida. El caudal medio va desde los $17\text{-}18 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta alcanzar los $25\text{-}26 \text{ m}^3/\text{s}$ superándose de esta forma el umbral bankfull. El último tramo consta de un marcado descenso de caudal desde los $25\text{-}26 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta alcanzar valores de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ que es cuando el descenso se frena considerablemente.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en que se superan el umbral bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto al primero, se supera durante el pico de caudal principal con una duración de un día aproximadamente. Por otra parte, el umbral de movilización de sedimentos se supera durante 4 días y medio aproximadamente atendiendo a la gráfica.

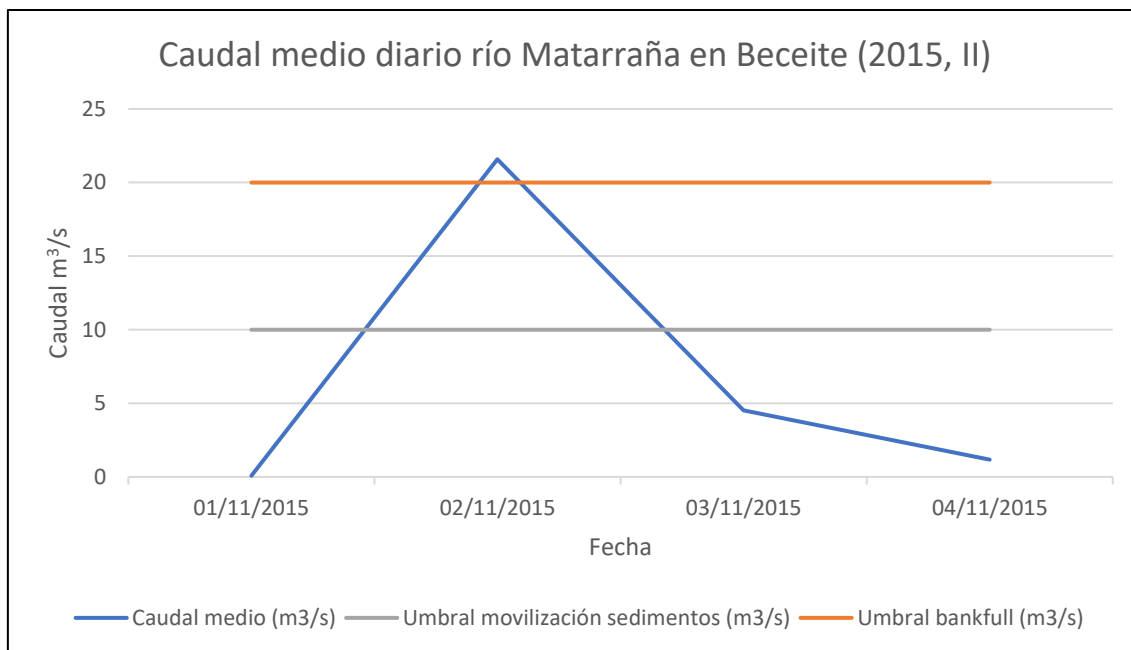


Figura 38: Caudal medio diario del río Matarraña durante la crecida del año 2015 (II) en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En la presente gráfica aparecen representados en el eje de abscisas la fecha y en el eje de ordenadas el caudal en m^3/s . Tanto en esta como en el resto de las crecidas hay que destacar que los caudales que se muestran son medios, por lo que no hacen referencia a caudales máximos instantáneos. En esta crecida de (2015, II) se aprecia un único pico de caudal como ya es la tendencia general de las crecidas analizadas. Esto quiere decir que tiene el carácter de simple.

Respecto a la duración, también sigue la tendencia general observada. Esto se traduce en ser crecidas de corta duración temporal con un periodo en días entre 3 y 4 aproximadamente. Además, presenta una rápida respuesta hidrológica con caudales medios que superan el umbral bankfull de los $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por tramos de la gráfica, se observa una diferenciación en 2 partes. El primer tramo responde a un marcado ascenso de caudal con una rápida respuesta hidrológica. Este ascenso va desde los $0 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta los $22 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio aproximadamente (caudal medio máximo registrado). El segundo tramo se caracteriza por un marcado descenso de caudal tras alcanzar el pico principal de la crecida. El caudal medio va desde los $22 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta los $5 \text{ m}^3/\text{s}$ que es cuando se ralentiza el descenso y se da por finalizada la crecida. Como se puede apreciar se superan tanto el umbral bankfull como el de movilización de sedimentos a lo largo de la crecida.

Por último, cabe destacar el periodo de tiempo en que se superan el umbral bankfull y de movilización de sedimentos. Respecto al primero, se supera durante un corto periodo de tiempo coincidiendo con el momento de máximo caudal medio de la crecida. Este periodo de tiempo se estima en escasas horas. Sin embargo, el umbral de movilización de sedimentos se supera durante un periodo temporal mayor que el umbral bankfull. Este periodo de tiempo se estima en un día y medio aproximadamente.

3.1.4. *Síntesis y comparación*

A modo de resumen, se pueden describir los rasgos generales de las diferentes crecidas de los diferentes sistemas fluviales tratados.

	Río Ebro	Río Gállego	Río Matarraña
Caudales máximos (principal y secundarios)	Crecidas caracterizadas por presentar fundamentalmente un caudal máximo principal y varios secundarios (carácter complejo). Existencia también de crecidas simples (un único caudal máximo principal) aunque en menor proporción.	Crecidas caracterizadas por presentar fundamentalmente un único caudal máximo principal (carácter simple). Tan solo un par de crecidas presentan varios caudales máximos (principal y secundarios).	Crecidas caracterizadas por presentar un único caudal máximo principal (carácter simple). Tan solo en una de las crecidas analizadas se puede pensar que tiene carácter complejo (un caudal máximo principal y uno secundario).
Duración	Crecidas que van desde las 2 semanas las más cortas hasta 1 mes y medio las más largas. En líneas generales entre 4 semanas y 1 mes se dan la mayoría.	Crecidas que van desde los 3 días las más cortas hasta las 2 semanas las más largas. En líneas generales las crecidas duran de media una semana aproximadamente.	Crecidas con una duración media analizada de 3-4 días generalmente. Tan solo en una se observa una duración superior que ronda una semana aproximadamente.
Régimen estacional de caudal	Crecidas registradas durante finales del invierno y primera mitad de la primavera fundamentalmente.	Crecidas registradas durante meses primaverales y otoñales fundamentalmente.	Crecidas registradas durante meses primaverales y otoñales principalmente.
Umbrales bankfull y de movilización de sedimentos	Ambos se superan en cada una de las crecidas de forma clara. Tan solo en un par de crecidas se supera el umbral bankfull ligeramente.	Ambos se superan en cada una de las crecidas de forma clara. Tan solo en alguna crecida se supera el umbral bankfull ligeramente.	Ambos se superan en buena parte de las crecidas, si bien en determinadas crecidas no se supera el umbral bankfull e incluso el umbral de movilización de sedimentos.

Tabla 2: Rasgos generales de las crecidas fluviales de los diferentes ríos analizados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH, CHE y Anuario de Aforos.

3.2. Aplicación de parámetros e índices

3.2.1. Ebro medio

Caudal específico de la punta de la crecida (Qp) con el coeficiente A de Pardé

Río Ebro						
Crecidas	Caudal máximo m³/s	Caudal máximo l/s	Caudal específico l/s/km²	Coeficiente A de Pardé (m³/s/vkm²)	Superficie de la cuenca (km²)	Raíz cuadrada de la superficie de cuenca
1	2012	2012000	49,8	10,0	40.434	201,1
2	2237	2237000	55,3	11,1		
3	1806	1806000	44,7	9,0		
4	1952	1952000	48,3	9,7		
5	1604	1604000	39,7	8,0		
6	1755	1755000	43,4	8,7		
7	1629	1629000	40,3	8,1		
8	1715	1715000	42,4	8,5		
9	2448	2448000	60,5	12,2		
10	2037	2037000	50,4	10,1		

Tabla 3: Valores de caudal específico por medio del coeficiente A de Pardé calculados para cada una de las crecidas en el río Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Volumen de caudal de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (Vc)

Río Ebro					
Crecidas	Volumen de caudal (Hm³)	Superficie de la cuenca (Km²)	Raíz de la superficie de cuenca	Volumen de caudal (Hm³/km²)	Volumen de caudal (Hm³/raíz de km²)
1	1012,1	40.434	201,1	0,025	5,03
2	1143,0			0,028	5,68
3	815,0			0,020	4,05
4	1466,0			0,036	7,29
5	570,4			0,014	2,84
6	2714,6			0,067	13,50
7	951,4			0,024	4,73
8	587,1			0,015	2,92
9	2107,6			0,052	10,48
10	1175,4			0,029	5,85

Tabla 4: Resultado del cálculo de volumen de caudal por encima del umbral de movilización de sedimentos en el río Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (Tm)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Fecha	1997	2003	2003	2007	2009	2013 (I)	2013 (II)	2015 (I)	2015 (II)	2018
Horas caudal >400 m³/s	597 horas	527 horas	380 horas	701 horas	342 horas	1063 horas	645 horas	314 horas	744 horas	556 horas

Tabla 5: Valores de tiempo de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos en el río Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida geomórfica, en torno al caudal bankfull (entre 10% por debajo y 10% por encima) (Tb)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Fecha	1997	2003	2003	2007	2009	2013 (I)	2013 (II)	2015 (I)	2015 (II)	2018
Horas entre 1440-1760 m³/s	52 horas	38 horas	52 horas	86 horas	34 horas	156 horas	33 horas	56 horas	147 horas	51 horas

Tabla 6: Valores de tiempo de crecida geomórfica en el río Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida con desbordamiento, por encima de bankfull (Td)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Fecha	1997	2003 (I)	2003 (II)	2007	2009	2013 (I)	2013 (II)	2015 (I)	2015 (II)	2018
Horas caudal >1600 m³/s	47 horas	93 horas	32 horas	83 horas	0 horas	55 horas	2 horas	33 horas	147 horas	102 horas

Tabla 7: Valores de tiempo de crecida con desbordamiento en el río Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo transcurrido desde la crecida precedente (T_p)

[illegible]

Tabla 8: Valores de tiempo transcurrido entre crecidas en el río Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Cálculo de los índices TG y PC

Rio Ebro en Zaragoza (9011)										
Crecidas	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Qp (m³/s/km²)	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3
Vc (Hm²/km²)	4	4	3	4	3	4	3	3	4	4
Tm (horas)	5	5	4	5	4	5	5	4	5	5
Tb (horas)	5	4	5	5	4	5	4	5	5	5
Td (horas)	4	5	4	5	1	5	1	4	5	5
Tp (días)	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5
	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Índice de trabajo geomórfico (TG)	8,8	8,6	10,25	9,2	5,6	9,2	5,8	8,2	11,75	9,4
Índice de peligrosidad en crecida (PC)	8,2	8,2	9,25	8,4	5	8,4	5	7,4	11	8,8
Índice TG										
Cálculo Tb	20	16	20	20	16	20	16	20	20	20
Cálculo Td	12	15	12	15	3	15	3	12	15	15
Cálculo Tp	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5
			Índice TG = Qp + Vc + Tm + 4 Tb + 3 Td / Tp							
Índice PC										
Cálculo Tb	15	12	15	15	12	15	12	15	15	15
Cálculo Td	12	15	12	15	3	15	3	12	15	15
Cálculo Tp	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5
			Índice PC = 2 Qp + 2 Vc + 3 Tb + 3 Td / Tp							

Bajo

Moderado

Alto

Valores del índice
4-6 bajo, 7-9 moderado, 9-12 alto,

Tabla 9: Cálculo de los índices de trabajo geomórfico y peligrosidad en crecida del río Ebro.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH Ebro.

3.2.2. Bajo Gállego

Caudal específico de la punta de la crecida (Q_p) con el coeficiente A de Pardé

Río Gállego						
Crecidas	Caudal máximo m^3/s	Caudal máximo l/s	Caudal específico l/s/km ²	Coeficiente A de Pardé ($m^3/s/\sqrt{km^2}$)	Superficie de la cuenca (km ²)	Raíz cuadrada de la superficie de cuenca
1	242,36	242360	60,5	3,8	4009	63,3
2	626,13	626130	156,2	9,9		
3	366,76	366760	91,5	5,8		
4	376,2	376200	93,8	5,9		
5	246,6	246600	61,5	3,9		
6	334,48	334480	83,4	5,3		
7	1038,94	1038940	259,2	16,4		
8	552,06	552060	137,7	8,7		
9	280,4	280400	69,9	4,4		
10	423,18	423180	105,6	6,7		
11	266,88	266880	66,6	4,2		
12	354,05	354050	88,3	5,6		
13	359,03	359030	89,6	5,7		

Tabla 10: Valores de los caudales específicos por medio del coeficiente A de Pardé calculados para cada una de las crecidas del río Gállego. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Volumen de caudal de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (V_c)

Río Gállego					
Crecidas	Volumen de caudal (Hm ³)	Superficie de la cuenca (Km ²)	Raíz de la superficie de cuenca	Volumen de caudal (Hm ³ /km ²)	Volumen de caudal (Hm ³ /raíz de km ²)
1	6,7	4009	63,3	0,0017	0,11
2	86,1			0,0215	1,36
3	2,1			0,0005	0,03
4	45,9			0,0115	0,73
5	53,9			0,0134	0,85
6	22,7			0,0057	0,36
7	64,1			0,0160	1,01
8	32,2			0,0080	0,51
9	18,5			0,0046	0,29
10	36,3			0,0090	0,57
11	3,0			0,0007	0,05
12	19,1			0,0048	0,30
13	109,3			0,0273	1,73

Tabla 11: Resultado del cálculo del volumen de caudal por encima del umbral de movilización de sedimentos en el río Gállego. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (T_m)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10	Crecida 11	Crecida 12	Crecida 13
Fecha	2003	2003 (II)	2004	2007	2008	2009	2012	2013 (I)	2013 (II)	2013 (III)	2013 (IV)	2016	2018
Horas caudal >60 m ³ /s	29 horas	272 horas	15 horas	179 horas	171 horas	139 horas	41 horas	93 horas	178 horas	90 horas	12 horas	33 horas	344 horas

Tabla 12: Valores de tiempo de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos en el río Gállego. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida geomórfica, en torno al caudal bankfull (entre 10% por debajo y 10% por encima) (T_b)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10	Crecida 11	Crecida 12	Crecida 13
Fecha	2003 (I)	2003 (II)	2004	2007	2008	2009	2012	2013 (I)	2013 (II)	2013 (III)	2013 (IV)	2016	2018
Horas caudal 216-264 m ³ /s	4 horas	14 horas	1 hora	8 horas	34 horas	4 horas	2 horas	3 horas	5 horas	5 horas	3 horas	4 horas	9 horas

Tabla 13: Valores de tiempo de crecida geomórfica en el río Gállego. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida con desbordamiento, por encima de bankfull (Td)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10	Crecida 11	Crecida 12	Crecida 13
Fecha	2003	2003	2004	2007	2008	2009	2012	2013 (I)	2013 (II)	2013 (III)	2013 (IV)	2016	2018
Horas caudal >40 m³/s	1 hora	36 horas	5 horas	30 horas	13 horas	8 horas	28 horas	18 horas	8 horas	25 horas	2 horas	17 horas	32 horas

Tabla 14: Valores de tiempo de crecida con desbordamiento en el río Gállego. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo transcurrido desde la crecida precedente (T_p)

[illegible]

Tabla 15: Valores de tiempo transcurrido entre crecidas en el río Gállego. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Cálculo de los índices TG y PC

Río Gállego en Zaragoza (9089)														
Crecidas	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10	Crecida 11	Crecida 12	Crecida 13	
Qp (m³/s/vkm²)	1	2	2	2	1	2	4	2	1	2	1	2	2	
Vc (Hm³/km²)	2	3	1	3	3	2	3	2	2	2	1	2	4	
Tm (horas)	2	4	2	4	4	4	2	3	4	3	2	2	4	
Tb (horas)	1	3	1	2	4	1	1	1	2	2	1	1	2	
Td (horas)	1	4	2	4	3	2	4	3	2	4	1	3	4	
Tp (días)	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
														Muy bajo
														Bajo
														Moderado
														Alto
														Muy alto
Índice de trabajo geomórfico (TG)	2,4	11	3	5,8	6,6	3,6	5	4	4,2	5,4	2,7	3,8	6	
Índice de peligrosidad en crecida (PC)	2,4	10,333333	3	5,6	5,8	3,4	5,8	4	3,6	5,2	2	4	6	
Índice TG														
Cálculo Tb	4	12	4	8	16	4	4	4	8	8	4	4	8	Valores del índice 1-3 muy bajo, 3-4 bajo, 4-5 moderado, 5-7 alto, 7-11 muy alto
Cálculo Td	3	12	6	12	9	6	12	9	6	12	3	9	12	
Cálculo Tp	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Índice TG = Qp + Vc + Tm + 4 Tb + 3 Td /Tp													
Índice PC														
Cálculo Tb	3	9	3	6	12	3	3	3	6	6	3	3	6	
Cálculo Td	3	12	6	12	9	6	12	9	6	12	3	9	12	
Cálculo Tp	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	Índice PC = 2 Qp + 2 Vc + 3 Tb + 3 Td /Tp													

Tabla 16: Cálculo de los índices de trabajo geomórfico (TG) y de peligrosidad en crecida (PC) para cada una de las crecidas del río Gállego. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

3.2.3. *Alto Matarraña*

Caudal específico de la punta de la crecida (Q_p) con el coeficiente A de Pardé

Río Matarraña						
Crecidas	Caudal máximo m ³ /s	Caudal máximo l/s	Caudal específico l/s/km ²	Coeficiente A de Pardé (m ³ /s/√km ²)	Superficie de la cuenca (km ²)	Raíz cuadrada de la superficie de cuenca
1	334,11	334110	6960,6	48,2	48	6,9
2	37,3	37300	777,1	5,4		
3	26,9	26900	560,4	3,9		
4	50,7	50700	1056,3	7,3		
5	60,05	60050	1251,0	8,7		
6	21,2	21200	441,7	3,1		
7	45,1	45100	939,6	6,5		
8	36,65	36650	763,5	5,3		
9	30,15	30150	628,1	4,4		
10	75,35	75350	1569,8	10,9		

Tabla 17: Valores de los caudales específicos por medio del coeficiente A de Pardé calculados para cada una de las crecidas del río Matarraña. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Volumen de caudal de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (V_c)

Río Matarraña					
Crecidas	Volumen de caudal (Hm ³)	Superficie de la cuenca (Km ²)	Raíz de la superficie de cuenca	Volumen de caudal (Hm ³ /km ²)	Volumen de caudal (Hm ³ /raíz de km ²)
1	9,3	48	6,9	0,193	1,34
2	1,9			0,039	0,27
3	0,7			0,014	0,10
4	0,2			0,004	0,03
5	2,4			0,049	0,34
6	0			0,000	0,00
7	1,5			0,032	0,22
8	0,4			0,007	0,05
9	3,1			0,065	0,45
10	1,0			0,021	0,14

Tabla 18: Resultado del cálculo del volumen de caudal por encima del umbral de movilización de sedimentos en el río Matarraña. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos (T_m)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Fecha	2000	2002	2003	2004	2007	2011	2013	2014	2015 (I)	2015 (II)
Horas caudal >10 m ³ /s	67 horas	52 horas	33 horas	15 horas	40 horas	0 horas	45 horas	31 horas	20 horas	31 horas

Tabla 19: Valores de tiempo de crecida por encima del umbral de movilización de sedimentos en el río Matarraña. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida geomórfica, en torno al caudal bankfull (entre 10% por debajo y 10% por encima) (T_b)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Fecha	2000	2002	2003	2004	2007	2011	2013	2014	2015 (I)	2015 (II)
Horas caudal 18-22 m ³ /s	5 horas	17 horas	0 horas	0 horas	5 horas	0 horas	11 horas	0 horas	20 horas	9 horas

Tabla 20: Valores de tiempo de crecida geomórfica en el río Matarraña. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo de crecida con desbordamiento, por encima de bankfull (T_d)

	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Fecha	2000	2002	2003	2004	2007	2011	2013	2014	2015 (I)	2015 (II)
Horas caudal >20 m ³ /s	55 horas	18 horas	0 horas	0 horas	25 horas	0 horas	15 horas	0 horas	27 horas	4 horas

Tabla 21: Valores de tiempo de crecida con desbordamiento en el río Matarraña. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Tiempo transcurrido desde la crecida precedente (T_p)

[illegible]

Tabla 22: Valores de tiempo transcurrido entre crecidas en el río Matarraña. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

Cálculo de los índices TG y PC

Río Matarraña en Becite (9052)										
Crecidas	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Qp (m³/s/V/km²)	5	2	1	2	2	1	2	2	1	3
Vc (Hm³/km²)	5	4	3	2	4	1	4	2	4	3
Tm (horas)	3	3	2	2	2	1	2	2	2	2
Tb (horas)	2	3	1	1	2	1	3	1	4	2
Td (horas)	5	3	1	1	4	1	3	1	4	1
Tp (días)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Crecida 1	Crecida 2	Crecida 3	Crecida 4	Crecida 5	Crecida 6	Crecida 7	Crecida 8	Crecida 9	Crecida 10
Índice de trabajo geomórfico (TG)	7,2	6	2,6	2,6	5,6	2	5,8	2,6	7	3,8
Índice de peligrosidad en crecida (PC)	8,2	6	2,8	2,8	6	2	6	2,8	6,8	4,2
Índice TG										
Cálculo Tb	8	12	4	4	8	4	12	4	16	8
Cálculo Td	15	9	3	3	12	3	9	3	12	3
Cálculo Tp	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Índice TG = Qp + Vc + Tm + 4 Tb + 3 Td / Tp									
Índice PC										
Cálculo Tb	6	9	3	3	6	3	9	3	12	6
Cálculo Td	15	9	3	3	12	3	9	3	12	3
Cálculo Tp	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Índice PC = 2 Qp + 2 Vc + 3 Tb + 3 Td / Tp									

Muy bajo
Bajo
Moderado
Alto
Muy alto

Valores del índice

2-3 muy bajo, 3-5 bajo, 5-6 moderado, 6-7 alto, 7-9 muy alto

Tabla 23: Cálculo de los índices de trabajo geomórfico (TG) y de peligrosidad en crecida (PC) para cada una de las crecidas del río Matarraña. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la C.H.E.

3.2.4. Valoración de las crecidas en función de los índices TG y PC

Río Ebro			Río Gállego			Río Matarraña		
Crecida	Índice TG	Índice PC	Crecida	Índice TG	Índice PC	Crecida	Índice TG	Índice PC
2/3/2015	11,75	11	24/11/2003	11	10,33	23/10/2000	7,2	8,2
1/3/2003	10,25	9,25	26/5/2008	6,6	5,8	24/3/2015	7	6,8
15/4/2018	9,4	8,8	12/4/2018	6	6	8/5/2002	6	6
5/4/2007	9,2	8,4	3/4/2007	5,8	5,6	5/3/2013	5,8	6
23/1/2013	9,2	8,4	19/6/2013	5,4	5,2	21/12/2007	5,6	6
24/1/1997	8,8	8,2	21/10/2012	5	5,8	2/11/2015	3,8	4,2
9/2/2003	8,6	8,2	30/3/2013	4,2	3,6	29/11/2014	2,6	2,8
4/2/2015	8,2	7,4	20/1/2013	4	4	7/5/2003	2,6	2,8
2/4/2013	5,8	5	24/11/2016	3,8	4	29/3/2004	2,6	2,8
14/2/2009	5,6	5	16/4/2009	3,6	3,4	20/11/2011	2	2
			8/9/2004	3	3			
			11/11/2003	2,4	2,4			
			5/10/2013	2,2	2			

Tabla 24: Crecidas de cada sistema fluvial ordenadas en función de sus índices TG y PC. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHE.

En este capítulo del trabajo se van a analizar las crecidas más importantes para cada uno de los ríos estudiados en función de los valores de los índices calculados.

3.2.4.1. Río Ebro en Zaragoza

Para el periodo estudiado entre 1997-2019 la crecida más relevante atendiendo a los índices de Trabajo Geomórfico y Peligrosidad en Crecida es la que tuvo lugar en marzo de 2015, con valores de los índices TG y PC catalogados de muy alto.

Esta crecida atendiendo al pertinente hidrograma de crecida aparece catalogada como compleja. Presenta dos caudales punta siendo más significativo el segundo, que tuvo lugar a finales del mes de febrero y principios del mes de marzo. La principal explicación de esta crecida aguas debajo de la desembocadura del río Aragón en el Ebro es la alta pluviometría que tuvo lugar en el pirineo occidental, calculándose que el 10-15% de la aportación está relacionada con procesos de fusión nival (Ollero, *et al.* 2015).

Las inundaciones que tuvieron lugar consecuencia de la crecida originaron daños principalmente en explotaciones agrarias. El principal problema en estas explotaciones es que muchas de ellas se localizan en zonas inundables después de la crecida de 2003. Otras afecciones tuvieron lugar en las proximidades de la ciudad de Zaragoza (residencia de ancianos) y en la propia ciudad se constatan un aumento de daños respecto a la crecida que tuvo lugar en el año 2003. Es importante tener en cuenta que el aumento de daños también es consecuencia de un aumento en la urbanización de zonas próximas al cauce del río consecuencia de la realización de la Exposición Internacional de 2008.

Otro aspecto a tener en cuenta son los periodos de retorno asociados a las crecidas. Atendiendo a este caudal se constata que una crecida de estas características se espera que tenga una periodicidad de 5,88 años (ver **figura 39**). Dicho de otra forma, se espera que cada año la probabilidad de que se pueda dar una crecida de estas características es de 1/5,88.

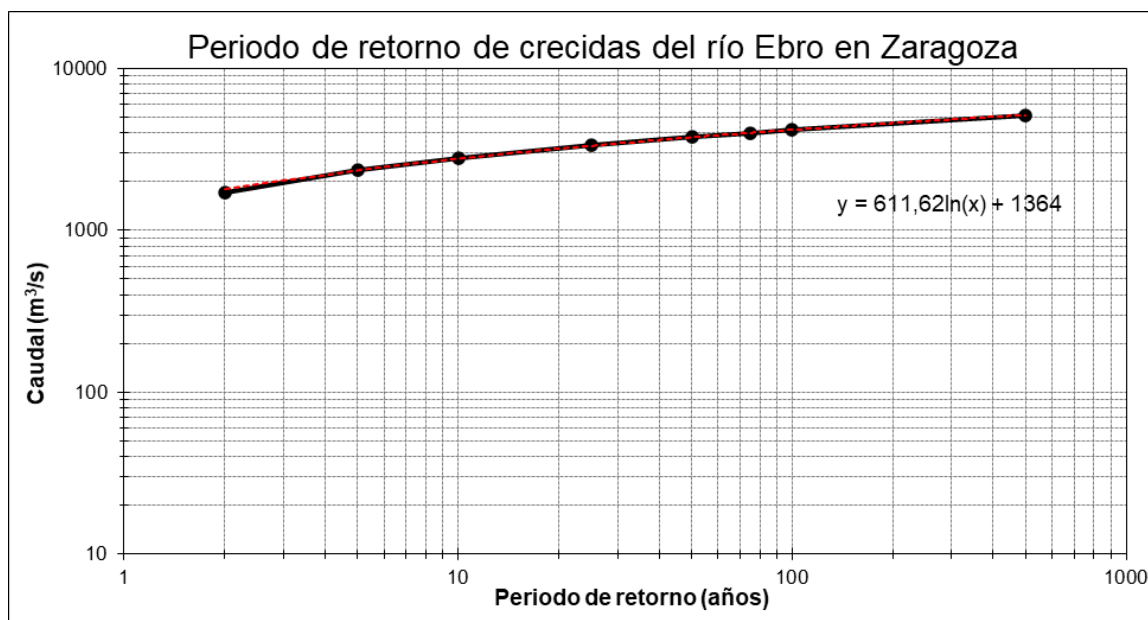


Figura 39: Periodo de retorno de crecidas del río Ebro en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Anuario de Aforos.

3.2.4.2. Río Gállego (aforos Zaragoza y Zuera)

Para el periodo de tiempo estudiado entre 2003-2019 la crecida más relevante atendiendo a los índices de Trabajo Geomórfico y Peligrosidad en Crecida es la que tuvo lugar en noviembre de 2003, con valores de los índices TG y PC catalogados de muy alto.

Esta crecida atendiendo al pertinente hidrograma de crecida se puede catalogar de compleja. Se observan dos puntas de caudal siendo la primera de ellas la que presenta un caudal máximo más importante (finales de noviembre). Posteriormente, se observa un descenso rápido de caudal, aunque siempre por encima del umbral de movilización de sedimentos. Tras unos días con un caudal estable superando los 100 m³/s se llega al segundo pico de la crecida (mucho menos abrupto que el que tuvo lugar a finales de noviembre).

El origen principal de la crecida viene de un desembalse consecuencia de una previsión de lluvias prolongadas que finalmente no tuvieron lugar. Algunos embalses como Lanuza, Búbal y La Peña tuvieron un papel fundamental de laminación reduciendo los efectos negativos de la crecida (Ollero, *et al.* 2003).

Los principales daños registrados tuvieron lugar en la localidad de Peñaflor. Los efectos se notaron en explotaciones ganaderas, tierras de cultivo y algunas urbanizaciones próximas al cauce del sistema fluvial.

Atendiendo al cálculo del periodo de retorno que supone una crecida de estas características, se constata que una crecida de estas características se espera que tenga una periodicidad de 14,90 años (ver **figura 40**). Dicho de otra forma, se espera que cada año la probabilidad de que se pueda dar una crecida de estas características es de 1/14,90.

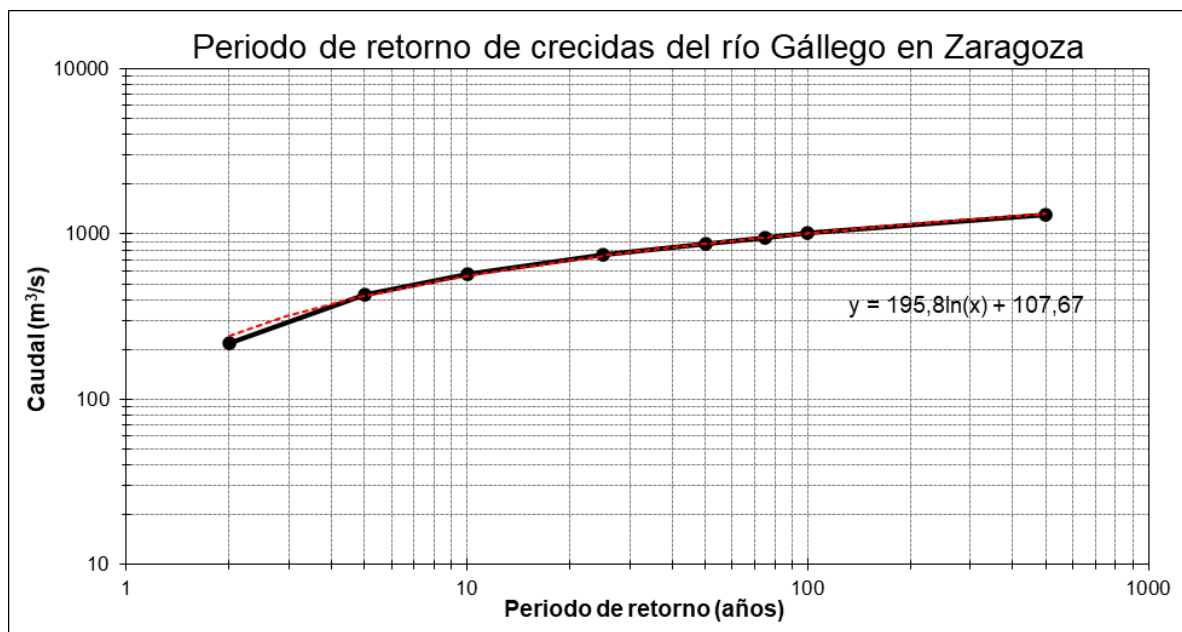


Figura 40: Periodo de retorno de crecidas del río Gállego en Zaragoza. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Anuario de Aforos.

3.2.4.3. *Río Matarraña en Beceite*

Para el periodo estudiado entre 2000-2019 la crecida más relevante atendiendo a los índices de Trabajo Geomórfico y Peligrosidad en Crecida es la que tuvo lugar en octubre de 2000, con valores de los índices TG y PC catalogados de muy alto.

En relación con la crecida del año 2000, tiene un carácter extraordinario y se caracteriza por ser simple atendiendo al pertinente hidrograma de crecida. Se observa una única punta de caudal y una respuesta hidrológica rápida consecuencia de un importante episodio de gota fría que tuvo lugar entre los días 21-24 de octubre de 2000. Las consecuencias sobre Beceite fueron marcadas quedando arrasada la toma de aguas, estaciones de aforo afectadas, huertos y caminos forestales desaparecieron, se produjeron desperfectos en el puente de la carretera y además tuvieron lugar numerosos desprendimientos y corrimientos de tierra.

Atendiendo al cálculo del periodo de retorno que supone una crecida de estas características, se constata que una crecida de estas características se espera que tenga una periodicidad de 4352 años (ver **figura 41**). Dicho de otra forma, se espera que cada año la probabilidad de que se pueda dar una crecida de estas características de 1/4352.

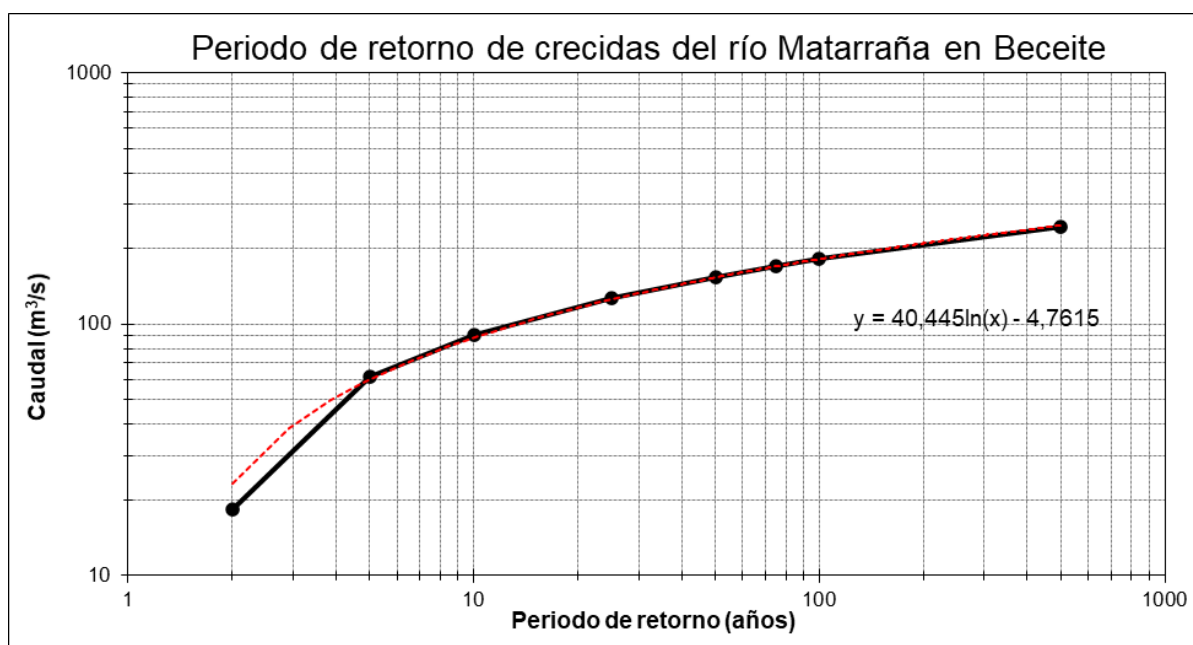


Figura 41: Periodo de retorno de crecidas del río Matarraña en Beceite. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Anuario de Aforos.

4. Discusión

Una vez expuestos los resultados de los dos índices para cada sistema fluvial, es necesario discutir sobre los rangos finales de valores (de muy alto a muy bajo). Como se ha podido comprobar, cada río tiene resultados diferentes, por sus características geomorfológicas, que llevan a establecer horquillas diferentes. Homogeneizar los umbrales de los parámetros para eliminar las discrepancias que pueden surgir entre ríos (caso del estudio) es una tarea que no ha resultado sencilla. Hay que tener en cuenta que se ha buscado eliminar el factor dimensional del río para poder comparar las crecidas más relevantes a nivel de los tres sistemas fluviales. En este aspecto, se ha conseguido discriminar bastante bien, pero los valores de los índices son mayores en el Ebro respecto al Gállego y Matarraña.

Es importante tener en cuenta que cada río tiene diferentes características geomorfológicas con lo cual resulta complicado poder diseñar, a partir de solo 3 casos, unos rangos de manera universal. Sin embargo, se ha podido ver como los ríos estudiados, con diferente régimen fluvial, responden de forma esperable tras aplicar los diferentes índices.

El hecho de ser un estudio pionero aplicado sólo a tres sistemas fluviales no permite establecer pautas concretas de cara a una utilización universal de los rangos de valores de los índices. En cualquier caso, se va realizar una tentativa para los tres ríos estudiados y también una global. Se presentan dos tablas que recogen las horquillas de los dos índices para los sistemas fluviales estudiados y otra universal con horquillas en 5 tramos (**tablas 25 y 26**). También, para valorar cómo quedan clasificadas las crecidas en base a estos rangos se elaboran dos tablas adicionales con la clasificación específica para cada río con los rangos de cada uno (**tabla 27**) y otra tabla con la clasificación de crecidas atendiendo a la propuesta que se expone en la **tabla 26 (tabla 28)**

Horquillas para los sistemas fluviales analizados

Rango de valores	Valor índices río Ebro	Valor índices río Gállego	Valor índices río Matarraña
Muy bajo	<4	<3	<3
Bajo	4-6	3-4	3-5
Moderado	6-9	4-5	5-6
Alto	9-12	5-7	6-7
Muy alto	>12	>7	>7

Tabla 25: Rango de valores asociado a los sistemas fluviales analizados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH, CHE y Anuario de Aforos.

Propuesta global índices TG y PC

Rango de valores	Índice Trabajo Geomórfico (TG)	Índice Peligrosidad en Crecida (PC)
Muy bajo	<4	<2
Bajo	4-5	2-4
Moderado	5-7	4-6
Alto	7-9	6-8
Muy alto	>9	>8

Tabla 26: Rango de valores asociado a la propuesta universal de aplicación de los índices. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH, CHE y Anuario de Aforos.

Clasificación de las crecidas analizadas en relación con los índices siguiendo la propuesta específica de cada sistema fluvial

Índice TG	Índice PC	Crecidas río Ebro	Crecidas río Gállego	Crecidas río Matarraña
Muy bajo	Muy bajo	Crecida 1 (1997)	Crecida 1 (2003, I)	Crecida 1 (2000)
Bajo	Bajo	Crecida 2 (2003, I)	Crecida 2 (2003, II)	Crecida 2 (2002)
Moderado	Moderado	Crecida 3 (2003, II)	Crecida 3 (2004)	Crecida 3 (2003)
Alto	Alto	Crecida 4 (2007)	Crecida 4 (2007)	Crecida 4 (2004)
Muy alto	Muy alto	Crecida 5 (2009)	Crecida 5 (2008)	Crecida 5 (2007)
		Crecida 6 (2013, I)	Crecida 6 (2009)	Crecida 6 (2011)
		Crecida 7 (2013, II)	Crecida 7 (2012)	Crecida 7 (2013)
		Crecida 8 (2015, I)	Crecida 8 (2013, I)	Crecida 8 (2014)
		Crecida 9 (2015, II)	Crecida 9 (2013, II)	Crecida 9 (2015, I)
		Crecida 10 (2018)	Crecida 10 (2013, III)	Crecida 10 (2015, II)
			Crecida 11 (2013, IV)	
			Crecida 12 (2016)	
			Crecida 13 (2018)	

Tabla 27: Clasificación de las crecidas analizadas en relación con los índices según la propuesta específica de cada sistema fluvial. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH, CHE y Anuario de Aforos.

Esta clasificación viene aplicada en el **apartado 2.3.** de resultados de manera individual para cada sistema fluvial. Lo que se hace aquí es una tabla general que recoja esos rangos de valores aplicados previamente.

Clasificación de las crecidas analizadas en relación con los índices siguiendo la propuesta universal de aplicación

Índice TG	Crecidas río Ebro (TG)	Crecidas río Gállego (TG)	Crecidas río Matarraña (TG)	Índice PC	Crecidas río Ebro (PC)	Crecidas río Gállego (PC)	Crecidas río Matarraña (PC)
Muy bajo	Crecida 1 (1997)	Crecida 1 (2003, I)	Crecida 1 (2000)	Muy bajo	Crecida 1 (1997)	Crecida 1 (2003, I)	Crecida 1 (2000)
Bajo	Crecida 2 (2003, I)	Crecida 2 (2003, II)	Crecida 2 (2002)	Bajo	Crecida 2 (2003, I)	Crecida 2 (2003, II)	Crecida 2 (2002)
Moderado	Crecida 3 (2003, II)	Crecida 3 (2004)	Crecida 3 (2003)	Moderado	Crecida 3 (2003, II)	Crecida 3 (2004)	Crecida 3 (2003)
Alto	Crecida 4 (2007)	Crecida 4 (2007)	Crecida 4 (2004)	Alto	Crecida 4 (2007)	Crecida 4 (2007)	Crecida 4 (2004)
Muy alto	Crecida 5 (2009)	Crecida 5 (2008)	Crecida 5 (2007)	Muy alto	Crecida 5 (2009)	Crecida 5 (2008)	Crecida 5 (2007)
	Crecida 6 (2013, I)	Crecida 6 (2009)	Crecida 6 (2011)		Crecida 6 (2013, I)	Crecida 6 (2009)	Crecida 6 (2011)
	Crecida 7 (2013, II)	Crecida 7 (2012)	Crecida 7 (2013)		Crecida 7 (2013, II)	Crecida 7 (2012)	Crecida 7 (2013)
	Crecida 8 (2015, I)	Crecida 8 (2013, I)	Crecida 8 (2014)		Crecida 8 (2015, I)	Crecida 8 (2013, I)	Crecida 8 (2014)
	Crecida 9 (2015, II)	Crecida 9 (2013, II)	Crecida 9 (2015, I)		Crecida 9 (2015, II)	Crecida 9 (2013, II)	Crecida 9 (2015, I)
	Crecida 10 (2018)	Crecida 10 (2013, III)	Crecida 10 (2015, II)		Crecida 10 (2018)	Crecida 10 (2013, III)	Crecida 10 (2015, II)
		Crecida 11 (2013, IV)				Crecida 11 (2013, IV)	
		Crecida 12 (2016)				Crecida 12 (2016)	
		Crecida 13 (2018)				Crecida 13 (2018)	

Tabla 28: Clasificación de las crecidas analizadas en relación con los índices según la propuesta universal de aplicación. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SAIH, CHE y Anuario de Aforos.

Tras ver las **tablas 27 y 28** se aprecian marcadas diferencias entre la clasificación de las crecidas según la propuesta específica (**tabla 27**) y la clasificación según la propuesta universal de aplicación de los índices que se ha realizado en la tabla 28. Al ser una tentativa de aplicación de los índices no se pueden sacar conclusiones claras de estas diferencias según el criterio de clasificación, pero es interesante tenerlas en cuenta de cara a seguir mejorando la aplicación global de los índices.

El aspecto positivo de esta tentativa es que se aprecia una coherencia entre los resultados de la aplicación de ambos índices con la importancia y daños que han provocado las distintas crecidas. Esto refuerza la línea a seguir para mejorar paulatinamente el índice y ajustarlo de la mejor manera posible a la mayoría de sistemas fluviales.

Además, estos índices geomorfológicos tienen una importancia y utilidad para la previsión y gestión del riesgo. Aportan un conocimiento sobre las características que tienen las crecidas y la peligrosidad que suponen. A valores más altos de los índices quiere decir que el trabajo geomorfológico que están haciendo los sistemas fluviales es mayor y, por tanto, se espera que la peligrosidad aumente. Dicho de otra forma, son herramientas que aportan información cuantitativa y que sientan las bases para una toma de decisiones sobre el riesgo que suponen las crecidas fluviales. Esto permite tener un mayor conocimiento sobre el territorio y poder valorar si se está ordenando de forma adecuada o no.

En ese sentido, es interesante seguir con este estudio y ampliar el radio de acción sobre diferentes ríos. Los principales problemas vienen en muchas ocasiones de datos hidrológicos limitados en algunas cuencas de interés. La red de estaciones de aforo abarca los ríos principales y deja más de lado otros cursos fluviales que pueden tener un interés geomorfológico y de gestión del riesgo (ríos efímeros). El trabajo de campo se erige como un aspecto fundamental para conocer los sistemas fluviales. Aspectos como el tamaño del sedimento, estructura del lecho y las márgenes pueden dar pistas sobre el trabajo geomorfológico que tiene un río en condiciones de crecidas. Esto no sirve para suplir las carencias de la falta de datos hidrológicos, pero permite tener un conocimiento territorial de las cuencas y poder comprender mejor los valores de los dos índices en caso de contar con datos hidrológicos. Este conocimiento permitirá realizar ajustes en los índices y poder aplicarse a diferentes tipologías de sistemas fluviales de manera universal.

En cualquier caso, los datos hidrológicos son la base para poder seguir ampliando este campo de acción y el primer paso para seguir realizando estudios de este tipo sobre diferentes sistemas fluviales es contar con una red de aforos amplia y que tenga en cuenta tipologías como las ramblas (cursos efímeros que llevan caudal en ocasiones contadas y con crecidas relámpago que provocan un importante trabajo geomorfológico). Además, es importante también tener unos datos homogeneizados que permitan realizar los estudios de manera correcta. En este aspecto un aspecto a mejorar en próximos estudios es contar con datos quinceminutales en las diferentes cuencas analizadas (Matarraña se ha tenido que adaptar la interpretación a los caudales medios diarios).

Se hace necesaria una buena prevención y control de los riesgos que llevan asociados estas crecidas con un importante trabajo geomorfológico. Se ha comprobado que en los sistemas fluviales con estaciones de aforo hay un mayor margen de maniobra para actuar y minimizar los riesgos, pero teniendo en cuenta que el estudio es limitado por el momento, es importante poner las herramientas necesarias para conseguir una buena ordenación del territorio y abarcar una red de aforos mayor en sistemas fluviales de diferentes tipologías.

Con este estudio se busca de manera indirecta concienciar a la población sobre la importancia que tienen los sistemas fluviales y crear conciencia sobre que la solución no pasa por hacer que los ríos se adapten a nuestras necesidades y modifiquemos su dinámica natural, sino ser nosotros los que nos adaptemos al funcionamiento de los ríos y ordenemos el territorio de manera acorde a minimizar los riesgos que conllevan las crecidas fluviales y que en muchas ocasiones vienen acrecentados por usos indebidos del suelo en zonas inundables y del Dominio Público Hidráulico (DPH).

5. Conclusiones

Una vez vistos los resultados y planteada la discusión, se pueden establecer las conclusiones basadas en los índices y sus valores.

Se puede observar por una parte que el índice de trabajo geomórfico presenta valores mayores que el de peligrosidad en crecida tanto en el Ebro como el Gállego. En el Matarraña por el contrario el índice de peligrosidad en crecida presenta valores superiores al de trabajo geomórfico. La explicación que puede tener esto son las características hidrológicas de los diferentes sistemas fluviales. En el Ebro medio y bajo Gállego con una laminación de las crecidas y mayor control y prevención de riesgos se disminuye la peligrosidad de las crecidas, aunque sigue habiendo un marcado trabajo geomórfico y de ahí que los valores sean superiores. Por el contrario, en el alto Matarraña con una menor regulación y prevención se observa un aumento proporcional de la peligrosidad en crecida.

Las características hidrológicas, además de las actuaciones antrópicas, también tienen repercusión en los valores que adoptan los índices. El Ebro medio y bajo Gállego tienen un comportamiento hidrológico muy diferente al alto Matarraña. Los dos primeros presentan tanto crecidas simples y complejas y su cuenca receptora es mucho mayor. Por el contrario, el Matarraña presenta un régimen hidrológico con crecidas simples y de rápida respuesta y la cuenca receptora es menor.

En este sentido, el origen de las crecidas es un factor determinante que explica su virulencia y el trabajo geomorfológico que realizan los ríos. En el Ebro y Gállego el origen de las crecidas es cantábrico-pirenaico y pirenaico respectivamente (frentes de NW de origen atlántico con lluvias suaves-moderadas y prolongadas en el tiempo) mientras que en el Matarraña es mediterráneo (borrascas y gotas frías en la zona del Mediterráneo que dan lugar a importantes episodios de precipitación en periodos cortos de tiempo). Esto conlleva que la intensidad de las precipitaciones sea diferente en los sistemas fluviales y, por tanto, las crecidas tengan unas características diversas. En el Ebro y Gállego las crecidas son más paulatinas y no tan súbitas como en el Matarraña, donde el régimen mediterráneo tiene influencia en la intensidad de las precipitaciones y en un súbito ascenso de los caudales al haber marcados procesos de escorrentía superficial.

Esto explica los diferentes valores obtenidos en los parámetros y *por ende* los índices. Tanto en el Ebro medio como en el bajo Gállego hay un mayor tiempo en horas de crecida geomórfica respecto al alto Matarraña, transcurre menos tiempo entre crecidas que superen el umbral bankfull y por su carácter complejo y con una respuesta hidrológica más lenta pueden permanecer un mayor número de horas superando el umbral bankfull y, por tanto, desbordados. Por el contrario, el Matarraña presenta un caudal específico en la crecida más importante de las analizadas muy superior al del Ebro medio y bajo Gállego en su crecida más importante según los índices. Esto remarca la virulencia de las crecidas de este río para ser una cuenca muy inferior a la del Ebro y Gállego.

En resumen, el Ebro y el Gállego son capaces de realizar un trabajo geomorfológico durante un mayor número de horas que el Matarraña, pero los daños generados y los procesos geomorfológicos pueden ser más elevados en el último por los elevados caudales específicos y las crecidas súbitas producidas. También destaca el volumen de caudal por encima del umbral de movilización de sedimentos. En términos relativos es mayor en el Ebro respecto al Gállego y Matarraña por ser la cuenca más grande, pero normalizando este volumen teniendo en cuenta

la superficie de cuenca hasta las estaciones de aforo se observa que ocurre a la inversa (Matarraña supera a Gállego y Ebro).

Los periodos de retorno para la crecida de mayor importancia de los tres sistemas fluviales son muy dispares. Muestra de ello es el elevado periodo de retorno calculado para el río Matarraña, lo cual no sucede en los otros dos ríos. Esto responde a la mayor virulencia y torrencialidad de las crecidas analizadas en el Matarraña respecto al Ebro y Gállego.

En suma, se observa una buena correlación entre los resultados de la aplicación de los índices y lo que se podía esperar de acuerdo con las características y funcionamiento en crecida de cada una de las tres cuencas. Por tanto, aunque son unos índices sencillos, que han constituido una primera aproximación y que deberán ser afinados en el futuro en cuanto se apliquen a más casos, se puede concluir que se está en el buen camino en esta línea de investigación, y que estos dos índices pueden ser ya de utilidad en la gestión de riesgos y la ordenación del territorio.

6. Referencias

- Alfieri, L., Pappenberger, F., Wetterhall, F. (2014) The extreme runoff index for flood early warning in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14: 1505-1515.
- Apel, H., Thielen, A.H., Merz, B., Blöschl, G. (2004) Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 295-308.
- Boné, P. (2006) *Estudio hidrogeomorfológico de las crecidas fluviales en la Cuenca del Matarraña hasta la confluencia con el río Algars*. Proyecto fin de Carrera, Licenciatura de Geografía, Universidad de Zaragoza.
- Camarasa, A.M., Soriano, J. (2012) Flood risk assessment and mapping in peri-urban Mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). *Landscape and Urban Planning*, 104: 189–200.
- Conesa, C., García Lorenzo, R. (2014) Flood hazard assessment for bridge crossings over ephemeral channels: a case study of the Murcia coast (SE Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(1): 119-146.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (2002) Desarrollo de la avenida de octubre de 2000, cuencas de los ríos Guadalupe y Matarraña, margen derecha del río Ebro. *VII Jornadas Españolas de Presas*, 383-394. Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- Davie, T. (2008) *Fundamentals of Hydrology*. Routledge, Abingdon.
- De Bruijn, K.M., Klijn, F., Öllfert, A., Penning-Rowsell, E., Simm, J., Wallis, M. (2009) *Flood risk assessment and flood risk management*. FLOODsite Consortium, 151 p., Delft.
- DEFRA (2003) Flood risks to people phase 1. In: R&D Technical Report FD2317. DEFRA & Environment Agency, Flood and Coastal Defence R&D Programme.
- DEFRA (2004) The appraisal of human related intangible impacts of flooding. In: R&D Technical Report FD 2005/TR. DEFRA & Environment Agency, Flood and Coastal Defence R&D Programme.
- DEFRA (2006) Flood risks to people phase 2. In: R&D Technical Report FD2321. DEFRA & Environment Agency, Flood and Coastal Defence R&D Programme.
- Del Valle, J. (2002) Las intensas lluvias y riadas del 23 al 25 de Octubre de 2000 en el SE de la cuenca del Ebro. Seguimiento y gestión mediante el S.A.I.H. de la C.H.E. *VII Reunión Nacional de Climatología*, Albarracín.
- Del Valle, J.; Ollero, A., Sánchez Fabre, M. (2007) *Atlas de los ríos de Aragón*. Prames, Zaragoza.
- Díez Herrero, A., Laín, L., Llorente, M. (2008) *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

- Díez Herrero, A., Garrote, J. (2020) Flood risk analysis and assessment, applications and uncertainties: a bibliometric review. *Water*, 12, 2050; doi: 10.3390/w12072050
- Environment Agency (2009) *Flooding in England: a national assessment of flood risk*. UK Environment Agency, Bristol.
- Foudi, S., Osés, N., Tamayo, I. (2015) Integrated spatial flood risk assessment: the case of Zaragoza. *Land Use Policy*, 42: 278-292.
- Galván, R. (2018) Cuatro grandes inundaciones históricas del Ebro en la ciudad de Zaragoza: 1643, 1775, 1871 y 1961. *Papeles de Geografía*, 64: 7-25.
- Hooke, J.M. (2015) Variations in flood magnitude–effect relations and the implications for flood risk assessment and river management. *Geomorphology*, 251: 91-107.
- Karmakar, S., Simonovic, S.P., Peck, A., Black, J. (2010) An information system for risk-vulnerability assessment to flood. *Journal of Geographic Information System*, 2(2): 129-146.
- Lorenzo, J., Amengual, A., García, C., Morán, E., Homar, V., Maimó-Far, A., Hermoso, A., Ramis, C., Romero, R. (2019) Hydro-meteorological reconstruction and geomorphological impact assessment of the October, 2018 catastrophic flash flood at Sant Llorenç, Mallorca (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19: 2597-2617.
- Marqués, L.A. (2018) *Alteraciones hidrogeomorfológicas en el Bajo Gállego a partir del registro instrumental*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Martín Vide, J.P. (Coord., 2018) *Estudio hidrológico, geomorfológico, hidráulico y ecológico del bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza para su gestión como espacio fluvial dentro del desarrollo urbano sostenible de la ciudad de Zaragoza*. Ayuntamiento de Zaragoza.
- Martín Vide, J.P. (Coord., 2019) *Estudio del equilibrio sedimentario del río Ebro en el tramo urbano de Zaragoza*. Ayuntamiento de Zaragoza (informe inédito).
- Okazawa, Y., Yeh, P.J.F., Kanae, S., Oki, T. (2011) Development of a global flood risk index based on natural and socio-economic factors. *Hydrological Sciences Journal*, 56(5): 789-804.
- Ollero, A. (2000) Crecidas fluviales en la cuenca del Ebro desde 1980: estado de la cuestión, principales eventos y sistemas de prevención. *Serie Geográfica*, 9: 151-162.
- Ollero, A (2006) Inundaciones y ordenación del territorio fluvial en la cuenca del Ebro. En Chastagnaret, G., Gil Olcina, A. (Dirs.) *Riesgo de inundaciones en el Mediterráneo occidental*, 239-272, Casa de Velázquez y Universidad de Alicante.
- Ollero, A. (2007) *Territorio fluvial. Diagnóstico y propuesta para la gestión ambiental y de riesgos en el Ebro y los cursos bajos de sus afluentes*. Bakeaz y Fundación Nueva Cultura del Agua, 255 p., Bilbao.

- Ollero, A. (2014) *Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores*. Contrato del río Matarraña, ECODES.
- Ollero, A. (2020) Crecidas, inundaciones y resiliencia: restauración fluvial contra los falsos mitos. En López Ortiz, M.I. y Melgarejo, J. (Eds) *Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes*, 549-567, Universitat d'Alacant.
- Ollero, A., Martín Vide, J.P. (Coords., 2005) Estudio hidrológico, geomorfológico, hidráulico y ecológico del bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza para su gestión como espacio fluvial. Estudio técnico, Ayuntamiento de Zaragoza.
- Ollero, A., Sánchez Fabre, M., Marín, J.M., Fernández, D., Ballarín, D., Mora, D., Montorio, R., Beguería, S. y Zúñiga, M. (2004) Caracterización hidromorfológica del río Gállego. En Peña, J.L., Longares, L.A. y Sánchez-Fabre, M. (Eds.) *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*, 117-129. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico.
- Ollero, A., Sánchez Fabre, M. (2015) Las inundaciones del Ebro en febrero y marzo de 2015. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(3): 150-151.
- Ollero, A., García, J.H., Ibisate, A., Sánchez Fabre, M. (2020) Updated knowledge on floods and risk management in the Middle Ebro River: the "Anthropocene" context and river resilience. *Cuadernos de Investigación Geográfica* (in press).
- Pardé, M. (1961) *Sur la puissance des crues en diverses parties du monde*. Zaragoza, Instituto Elcano del C.S.I.C., 293 pp.
- Patrikaki, O., Kazakis, N., Kougias, I., Patsialis, T., Theodossiou, N., Voudouris, K. (2018) Assessing flood hazard at river basin scale with an index-based approach: the case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 8, 50; doi:10.3390/geosciences8020050.
- Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J., Green, C. (2005) *The benefits of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques*. Middlesex University Press.
- Peña, J.L., Rubio, V., Longares, L.A. y Sánchez Fabre, M. (2011) El meandro de la Peña el Cuervo: un ejemplo de la dinámica fluvial actual del bajo Gállego (Depresión del Ebro). *Geographica*, 59-60: 281-294.
- Peña, J.L., Longares, L.A., Rubio, V., Sampietro, M.M., Sánchez Fabre, M. (2020) Dynamic changes in the lower Gállego river (Ebro basin, NE Spain) and their relationship with anthropic activities and the quaternary substrate. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(2): 371-393.
- Ruiz Bellet, J.L. (2016) *Quantitative historical hydrology in the eastern area of the Ebro River basin (NE Iberian Peninsula)*. PhD Thesis, Universitat de Lleida.
- Salvador, D. (2016) *Análisis y valoración del riesgo asociado a cursos efímeros en núcleos de población de la cordillera Ibérica*. Trabajo fin de Grado en Geografía y Ordenación del

Territorio, Universidad de Zaragoza.

- Sánchez Fabre, M., Ollero, A., Mora, D., Del Valle, J., Ballarín, D. (2013) *Los ríos de la provincia de Teruel*. Cartillas Turolenses nº 28, Diputación de Teruel, 58 p.
- Sánchez Fabre, M., Ballarín, D., Mora, D., Ollero, A., Serrano Notivoli, R., Saz, M.A. (2015) Las crecidas del Ebro medio en el comienzo del siglo XXI. En De la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodrigues, M. (Eds.) *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación, 1853-1862*, Universidad de Zaragoza y Asociación de Geógrafos Españoles.
- Sánchez Fabre, M., Ollero, A., Moreno, M.L., Losada, J.A., Sánchez Puertas, J.R., Serrano Notivoli, R. (2018) Évolution hydrologique et inondations récentes dans l'Èbre moyen. *Sud-Ouest Européen*, 44: 97-116.
- Schroeder, A.J., Gourley, J.J., Hardy, J., Henderson, J., Parhi, P., Rahmani, V., Reed, K., Schumacher, R.S., Smith, B.K., Taraldsen, M.J. (2016) The development of a flash flood severity index. *Journal of Hydrology*, 541: 523-532.
- Smith, G.E. (2010) *Development of a flash flood potential index using physiographic data sets within a geographic information system*. Master Thesis, University of Utah.
- Tascón, L., Ferrer, M., Ruiz, M., García Meléndez, E. (2020) Social vulnerability assessment for flood risk analysis. *Water*, 12, 558; doi 10.3390/w12020558.
- Țîncu, R., Lazar, G., Lazar, I. (2018) Modified Flash Flood Potential Index in order to estimate areas with predisposition to water accumulation. *Open Geosciences*, 10: 593-606.
- Villacis, C., León, E., Selleri, A.M., O'Donnell, I. (2009) *Simplified Flood Risk Assessment Tool (FRAT). Methodology and tools*. Global risk identification programme "Better Risk Information for Sound Decision Making". GRIP, UN-HABITAT, IFRC.